

Advanced Engineering Research

Теоретический и научно-практический журнал

Don State Technical University

Том 20 № 3 2020 | Vol. 20 no. 3 2020

ISSN 2687-1653

1 Механика
Mechanics

2 Машиностроение и машиноведение
Machine Building and Machine Science

3 Информатика, вычислительная техника и управление
Information Technology, Computer Science, and Management

DOI 10.23947/2687-1653

vestnik-donstu.ru

Advanced Engineering Research

Т. 20, № 3

**Теоретический
и научно-практический журнал**

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
июль-сентябрь 2020 г.

**ISSN 2687-1653
DOI: 10.23947/2687-1653**

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Предыдущее название журнала (до августа 2020): Вестник Донского государственного технического университета

***Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),
а также в международной базе EBSCO
Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref***

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Над номером работали:
И. В. Бойко, Г. И. Рассохин, М. П. Смирнова (англ. версия)

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372
E-mail: vestnik@donstu.ru http://vestnik-donstu.ru/



СОДЕРЖАНИЕ

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО
ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST



70 лет Михаилу Аркадьевичу Тамаркину — инженеру, педагогу и ученому



9 сентября исполнилось 70 лет доктору технических наук, профессору Михаилу Аркадьевичу Тамаркину.

Михаил Аркадьевич Тамаркин окончил Ростовский институт сельхозмашиностроения по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструмент». Получив опыт работы на производстве (завод «Рубин», с 1972 по 1975 гг.), дальнейшую трудовую деятельность он посвятил подготовке высококвалифицированных кадров для машиностроительных предприятий.

С 1998 года Михаил Аркадьевич возглавляет одну из ведущих кафедр университета — кафедру «Технология машиностроения», является председателем научно-методического совета по укрупненной группе направлений 15.00.00 «Машиностроение». Ученый внес существенный вклад в развитие и совершенствование образовательного процесса в университете по подготовке бакалавров, магистров и аспирантов, опубликовал более 300 научно-методических работ, в том числе 14 учебных пособий, 4 монографии, которые являются важной учебно-методической литературой по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Тамаркин М. А. — известный в России и за рубежом учёный в области вибрационных технологий. Им разработаны методические основы расчета оптимальных технологических параметров вибрационной обработки; теоретические основы надёжности технологических систем обработки деталей свободными абразивами. Результаты его научных исследований внедрены на многих предприятиях машиностроительной отрасли. Им подготовлены 21 кандидат технических наук. Под руководством Тамаркина М. А. на базе ДГТУ ежегодно проводится научный семинар «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий», посвящённый памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почётного профессора ДГТУ А. П. Бабичева, а также международный научный симпозиум технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий».

Ученый является членом трех диссертационных советов: Д 212.058.06, специальность 05.26.01 «Охрана труда (по отраслям)»; Д 212.058.02, специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» ДГТУ и совета Д 900.007.01, специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» на базе Севастопольского государственного университета, а также членом Ученого совета ДГТУ.

Тамаркин М. А. награжден знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации» в 2011 г., медалью Союза машиностроителей России «За доблестный труд» в 2013 г. В 2015 году ему было присвоено почетное звание «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации»; в 2018 г. награжден Федерацией космонавтики России медалью имени К. Э. Циолковского; в 2020 году присвоено звание «Почетный профессор ДГТУ».

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 004.75 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-205-215

Нейросетевая технология идентификации размеров дефекта в полуплоскости на основе временного и позиционного сканирования



А. Н. Соловьев[1,2], А. В. Черпаков[1,2], П. В. Васильев[1], И. А. Паринов[2], Е. В. Кириллова[3]
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2] ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[3]Рейн-Майн Университет прикладных наук (г. Висбаден, ФРГ)

Введение. Актуальность выбранной темы исследования обусловлена необходимостью проведения быстрой оценки состояния и надежности материалов, применяемых в различных конструкциях. Целью работы явилось исследование параметров влияния дефекта на отклик поверхности среды на ударное воздействие. ешение обратной задачи о восстановлении радиуса дефекта базируется на основе сочетания расчетного подхода и применения искусственных нейронных сетей (*ИНС*). Авторами построена методика восстановления параметров дефекта на основе применения численного моделирования и *ИНС*.
Материалы и методы. Поставленная задача решается в плоской постановке с помощью метода конечных элементов (*МКЭ*). В работе использовались линейные уравнения теории упругости с учетом диссипации энергии. В качестве метода решения краевой задачи применялся метод конечных элементов, реализованный в пакете *ANSYS*. В качестве моделирования процесса применения (*ИНС*) — комплекс *MATLAB*.
Результаты исследования. Разработана конечно-элементная модель слоистой конструкции в плоской постановке задачи в пакете *ANSYS*. Решена задача определения нестационарных колебаний при импульсном нагружении для различных вариаций радиуса дефекта. Применено позиционное сканирование объекта исследований. Построены графические зависимости амплитуд колебаний точек на поверхности от радиуса дефекта.
Обсуждение и заключения. В качестве результатов исследования зависимостей откликов колебаний от радиуса дефекта был разработан подход к восстановлению данного параметра в плоской конструкции на основе сочетания метода конечных элементов и *ИНС*. Исследование показало, что использованного объема данных достаточно для успешного обучения построенной модели *ИНС* и проведения идентификации скрытого дефекта в конструкции.

Ключевые слова: плоская слоистая конструкция, дефект, неразрушающая диагностика, конечно-элементное моделирование, импульсное воздействие, нестационарные колебания, поверхностные волны, искусственные нейронные сети, позиционное сканирование, амплитудно-временные характеристики.

***Для цитирования*:** Нейросетевая технология идентификации размеров дефекта в полуплоскости на основе временного и позиционного сканирования / А. Н. Соловьев, А. В. Черпаков, П. В. Васильев [и др.] // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т.20, №3. — С. 205–215. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-205-215

Финансирование: работа выполнена при поддержке внутреннего гранта Южного федерального университета № ВнГр-07/2020-04-ИМ (Министерства науки и высшего образования Российской Федерации).

Neural network technology for identifying defect sizes in half-plane based on time and positional scanning

A.N. Solov'ev[1,2], A.V. Cherpakov[1,2], P.V. Vasil'ev[1], I.A. Parinov[2], E.V. Kirillova[3]
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[3] RheinMain University of Applied Sciences (Wiesbaden, Germany)

Introduction. The selected research topic urgency is due to the need for a quick assessment of the condition and reliability of materials used in various designs. The work objective was to study parameters of the influence of the defect on the response of the surface of the medium to the shock effect. The solution to the inverse problem of restoring the radius of a defect is based on the combination of a computational approach and the use of artificial neural networks (ANN). The authors have developed a technique for restoring the parameters of a defect based on the computational modeling and ANN.
Materials and Methods. The problem is solved in the flat setting through the finite element method (FEM). In this paper, we used the linear equations of the elasticity theory with allowance for energy dissipation. The finite element method implemented in the *ANSYS* package was used as a method for solving the boundary value problem. *MATLAB* complex was used as a simulation of the application process (ANN).
Results. A finite element model of a layered structure has been developed in a flat formulation of the problem in the *ANSYS* package. The problem of determining unsteady vibrations under pulsed loading for different radius variations of the defect is solved. Positional scanning of the research object is applied. Graphical dependences of the vibration amplitudes of points on the surface on the defect radius are plotted.
Discussion and Conclusions. As a result of studying the dependences of vibration responses on the defect radius, the authors have developed an approach to restore this parameter in a flat structure based on a combination of the FEM and ANN. The research has shown that the amount of data used is sufficient for successful training of the constructed ANN model and identification of a hidden defect in the structure.

Keywords*:* flat layered structure, defect, non-destructive diagnostics, *FE* modeling, impulse action, unsteady oscillations, surface waves, artificial neural networks, positional scanning, amplitude-time characteristics.

For citation: A.N. Solov'ev, A.V. Cherpakov, P.V. Vasil'ev, et al. Neural network technology for identifying defect sizes in half-plane based on time and positional scanning**.** Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 205–215. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-205-215

Funding information: the research is supported by an internal grant from the Southern Federal University no. ВнГр-07/2020-04-ИМ (RF Ministry of Science and Higher Education)

Введение. Существует обширный перечень различных строительных, мостовых конструкций, зданий, оснований, грунтов, композитных материалов, которые эксплуатируются в различных условиях. Конструкции могут иметь достаточно большой ресурс эксплуатации и дефекты различной конфигурации: трещины, полости, включения, коррозионные изменения структуры, вмятины и пр. Вследствие этого могут возникать непредвиденные предаварийные состояния и отказы конструкции. Для предупреждения аварийного состояния требуется решение задачи их ранней диагностики.

Этот факт определяет необходимость использования различных методов неразрушающего контроля [1–2]. Некоторые направления развития отдельных методов диагностики наличия дефектов в различных объектах представлены в [3–10].

Основа методов состоит в сборе и анализе определенных параметров конструкции, являющихся откликом при ее нагружении. В качестве одного из таких параметров может быть вибросмещение определенных точек поверхности при импульсном нагружении колебаний конструкции. При этом от места возбуждения колебаний распространяется волновой фронт, возбуждающий смещение точек и колебания всех элементов конструкции. Задача может быть сведена к рассмотрению измерения скоростных параметров распространения волнового поля. Основываясь на анализе публикаций в иностранной литературе, можно констатировать, что экспериментальные исследования показывают явную тенденцию к оперированию методом «измерения скорости» [11–12].

Применение специализированных приборов, которые располагаются в определенных точках объекта и осуществляют сбор информации о различных параметрах колебаний, описаны в [13, 14]. Данная методика предполагает позиционное, временное и частотное сканирование объектов исследования. Наиболее привлекательным является использование акустических датчиков и приемников, установленных на внешней поверхности конструкции. Данные датчики могут фиксировать отраженные сигналы от дефектов. Применение

диагностических систем и комплексов требует разработки программного обеспечения (*ПО*), которое позволяет производить первичный анализ сигнала. В случае «тонкой» приборной настройки, например, при применении специальных алгоритмов обработки по анализу отраженного сигнала, *ПО* позволяет идентифицировать дефектную область конструкции. Соответствующее *ПО* может быть разработано на основе использования искусственной нейронной сети (*ИНС*) [15]. Применение *ИНС* в задачах реконструкции поврежденного состояния элементов конструкций описано в работах [16–26]. Применение различных архитектур и алгоритмов *ИНС* описано в [16–20]. Определению дефектов в анизотропных пластинах с помощью *ИНС* посвящена работа [21]. В работе [22] авторы указали преимущества методов идентификации, не требующих предварительного построения математической модели объекта исследования.

В настоящей работе разрабатывается метод реконструкции диаметра круглого дефекта, расположенного в полуплоскости слоистой конструкции. Такого рода дефекты могут часто встречаться при вскрытии верхних слоев грунтов в виде уплотнений каменных структур под слоями дорожной одежды. Модуль упругости и плотность таких структур могут в разы отличаться от основных параметров слоя. В математической постановке проблема сводится к решению обратной геометрической задачи теории упругости [27]. Рассматривается построение алгоритма восстановления информации об объекте, локализованном в определенном месте. Для этого рассматривается применение метода *КЭ*, анализ результатов поверхностных волн и корреляционный анализ зависимости параметров дефекта от волнового поля отклика с применением *ИНС*.

Материалы и методы. Предлагается подход целью которого является восстановление информации о параметрах дефектной области конструкции на основе анализа отклика поверхности среды на ударное воздействие. Анализ осуществляется на основе построенных алгоритмов при сочетании расчетного подхода и применения *ИНС*. В качестве образца рассмотрен слоистый материал.

Нагружение конструкции импульсным ударным воздействием производится на некотором расстоянии от исследуемой зоны, а датчики, регистрирующие колебания, располагаются в определенных позициях и последовательности в линейном направлении зоны исследования. Могут измеряться поперечные и продольные колебания. Интерес представляет период времени, когда волны, отраженные от концов моделируемого участка конструкции, не успевают достичь датчика. Таким способом имитируется моделирование реальных условий эксплуатации слоистой конструкции грунтового основания. Анализ измеренных амплитудно-временных характеристик (*АВХ*) показывает возможность их использования в обратных задачах восстановления дефектов.

В качестве инструмента решения обратной задачи реконструкции параметров дефекта используется *ИНС*, которые изначально проектировались для решения задач определения нелинейных зависимостей в многомерных массивах данных. В отличие от других алгоритмов, *ИНС* не программируются, а обучаются на множестве данных для исследуемых параметров конструкции. Обучающие выборки строятся путем решения прямых задач в конечно-элементном (*КЭ*) пакете *ANSYS*. Обученная сеть, получив новые, неизвестные ранее результаты анализа, способна корректно распознать параметры дефекта.

Эффективные применения аналитического и численного моделирования, достаточно хорошо коррелирующие с восстанавливаемыми параметрами элементов конструкций, представлены в [28–34].

Постановка задачи. Поставленная задача решается в плоской постановке с помощью метода конечных элементов (*МКЭ*). В настоящей работе используются линейные уравнения теории упругости с учетом диссипации энергии, принятой в пакете *ANSYS* [34, 35].

Для упругой среды:

$$\rho\ddot{u}_i + \alpha\rho\dot{u}_i - \sigma_{ij,j} = f_i\ ;$$
$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}(\varepsilon_{kl} + \beta\dot{\varepsilon}_{kl})\ ;$$
$$\varepsilon_{kl} = \frac{u_{k,l} + u_{l,k}}{2},$$

где ρ — плотность материала; u_i — компоненты вектора-функции перемещений; $\sigma_{i,j}$ — компоненты тензора механических напряжений; f_i — компоненты вектора плотности массовых сил; ε_{kl} — компоненты тензора деформаций; c_{ijkl} — компоненты тензора четвертого ранга упругих модулей; α — неотрицательные коэффициенты демпфирования (в ANSYS).

Рассмотрим подробнее механические краевые условия. При определении механических граничных условий граница тела представляется в виде объединения непересекающихся областей $S = S_u S_t S_{ut}$, на которых задаются следующие условия:

— условие закрепления границы или заданных перемещений:

$$u_i|_{S_u} = u_i{}^0,$$

— условие силового воздействия, при которых заданы компоненты вектора механических напряжений:

$$t_i = \sigma_{ij}n_j\big|_{S_t} = p_i,$$

— условие гладкого контакта с абсолютно твердым телом — равенство нулю нормальных перемещений и касательных напряжений:

$$u_n = u_i n_i|_{S_{ut}} = 0, t_i{}^{(k)} = \sigma_{ij}n_j\tau_i{}^{(k)}\big|_{S_{ut}} = 0.$$

Описание модели. Рассматривается слоистая конструкция. Верхний слой жестко сцеплен с подстилающим полупространством (рис. 1). В слое 1 расположен дефект в виде круглой конфигурации с центром на определенной глубине. Свойства материала представлены в таблице 1. Дефект расположен на глубине Y_{loc} = 1,5 м от поверхности и на расстоянии X_{loc} = 2 м от точки P_1 приложения единичного импульсного P_t (рис. 1) нагружения. Импульсное нагружение зависит линейно от времени приложения нагрузки (τ = 0,003 с), что соответствует параметрам реального ударного нагружения (рис. 2). В качестве входного параметра рассматривается поле смещений поверхности в результате кратковременного импульсного воздействия. Радиус дефекта варьируется в расчетах как: R_i = 0; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5 м. В качестве базовой цели ставится определение функциональной зависимости радиуса дефекта от откликов колебаний, измеренных в определенных точках конструкции на основе применения ИНС.

Таблица 1

Параметры слоев

№	Наименование	Толщина, *м*	E, Гпа	ρ, кг/м^3	ν	Коэффициент затухания
1	Слой 1	5	0,1	2000	0,33	0,001
2	Подстилающий слой	0,1	0,1	2000	0,33	0,1
3	Дефект R_i	X_{CENTER}=2 Y_{CENTER}= −1,5	1	2000	0,33	0,001

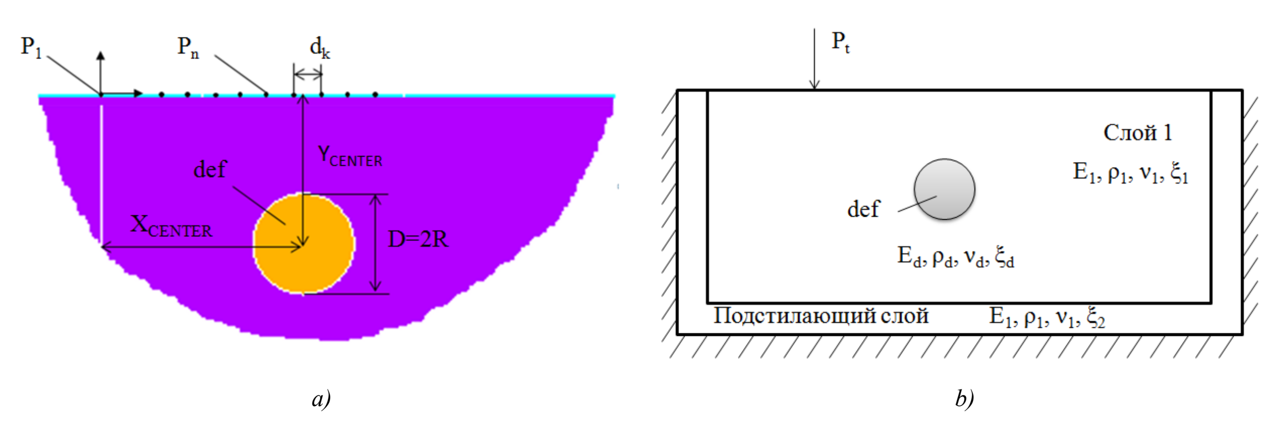


Рис. 1. Модель слоистой конструкции с круглым внутренним дефектом:
а — описание области с дефектом; b — схема модели слоистой конструкции

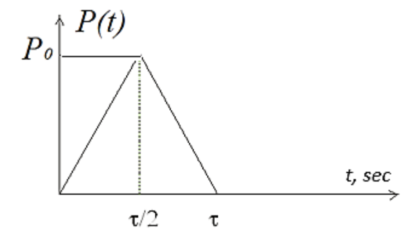


Рис. 2. Зависимость импульсной нагрузки P от времени нагружения

***КЭ* моделирование.** Моделирование плоской конструкции (ширина — *10 м*) с дефектом проведено в *КЭ* комплексе *ANSYS*: для моделирования применялись элементы типа *PLANE82* с треугольной и четырехугольной конфигурацией с плоской деформацией (*3950* узлов и *1890* конечных элементов). Внешний слой конструкции (подстилающий) имел большие коэффициенты демпфирования, но сохранял основные свойства слоя 1. Анализируемое время выбиралось таким, чтобы импульс от крайних границ конструкции не возвращался обратно. Это достигалось фиксацией времени резкого возрастания амплитуд колебаний у внешней границы слоя 1. Ударная нагрузка прикладывалась в точке P_t на поверхности конструкции.

Вследствие импульсного нагружения возникают поперечные и продольные волновые смещения точек как на поверхности конструкции, так и по всему ее объёму. Пример формы поперечных колебаний конструкции в момент времени $t = 0{,}01$ *с* представлен на рис. 3. Контрольные точки (40 точек) расположены на поверхности на расстоянии $dk = 0{,}1$ *м* друг от друга (рис. 1). Имитация распределения точек на поверхности отображает реальную картину измерений. Первая точка измерений расположена на расстоянии *0,1 м* от места ударного воздействия.

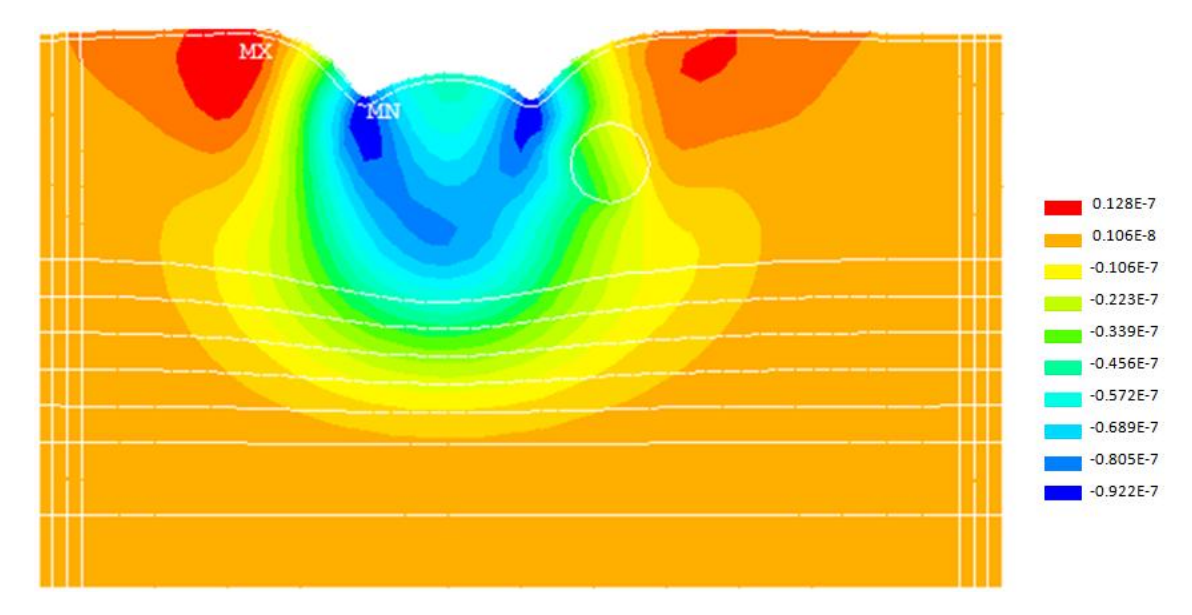


Рис. 3. Волновые смещения по толщине конструкции при $t = 0{,}01$ *с*

На рис. 4, 5 представлены результаты расчетов поперечных смещений (направление OY) в различных точках поверхности. В процессе решения задачи вычисляли поперечные смещения в контрольных точках конструкции на временном интервале t = 0–0,1 с. Особый интерес представляет поле смещений точек поверхностного слоя в промежутке времени t = 0–0,04 с. В данный период времени образуется первичная форма прогибов слоистой конструкции и отсутствуют отклики колебаний от возбуждения внешних слоев конструкции.

На рис. 5 приведены максимальные значения амплитуд колебаний в зависимости от времени их регистрации. Анализ показывает, что они имеют экспоненциальный приближенный тренд. Для одинаковых позиций измерения максимумов амплитуд имеются расхождения амплитуд колебаний в зависимости от величины радиуса дефекта.

На последующем этапе вычислены относительные значения смещения амплитуд ΔU_y (*a*), скорости ΔV_y (*b*) и ускорения ΔA_y (*c*) для точек N_p=1–40. Данные относительные значения вычислялись как разница между текущим показателем максимальной амплитуды для точки при R_i (при $i=2-7$) и амплитудой параметра колебаний при размере дефекта $R_1=0$ *(отсутствие дефекта в конструкции):*

$$\Delta U_{yi}=U_{yi}-U_{y1};$$

$$\Delta V_{yi}=V_{yi}-V_{y1};$$

$$\Delta A_{yi}=A_{yi}-A_{y1}.$$

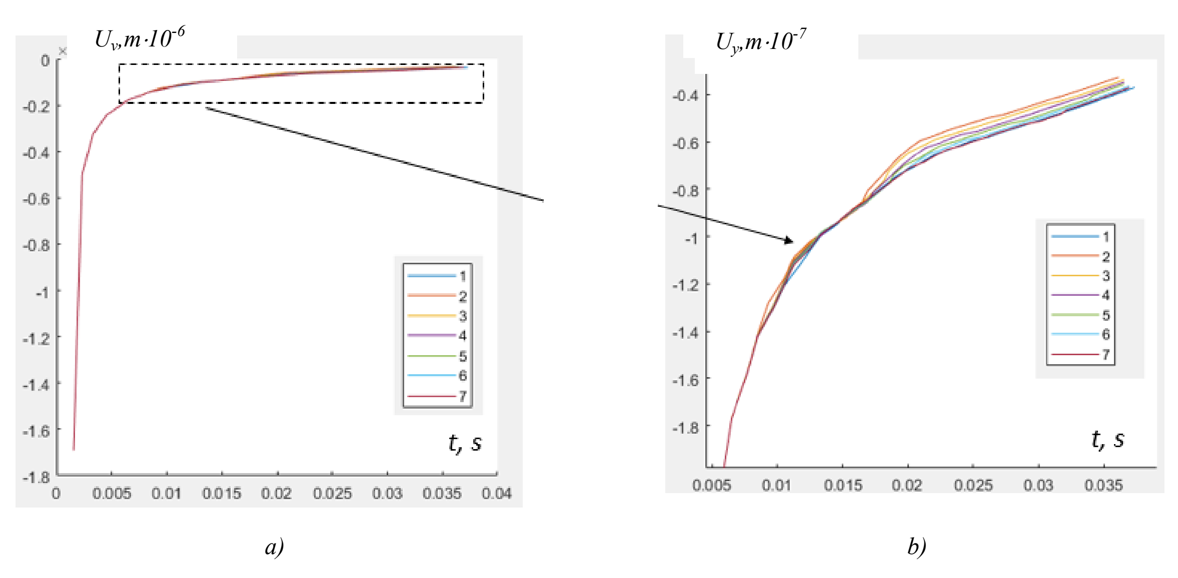
Ни рис. 6 приведены трехмерные графики, отображающие зависимости относительных величин смещения амплитуд ΔU_y (*a*), скорости ΔV_y (*b*) и ускорения ΔA_y (*c*) для точек N_p=1–40 на поверхности конструкции и варианта радиуса R_i дефекта.

a)

b)

c)

Рис. 4. Амплитуды смещений U_y *(a)*, скорости V_y *(b)* и ускорения A_y *(c)* в зависимости от времени для точек 1–40 на поверхности конструкции



a) b)

Рис. 5. Зависимости максимальных перемещений:
а — от времени для точек 1–40 на поверхности конструкции для семи вариантов радиусов дефекта;
b — для выделенной области амплитуд

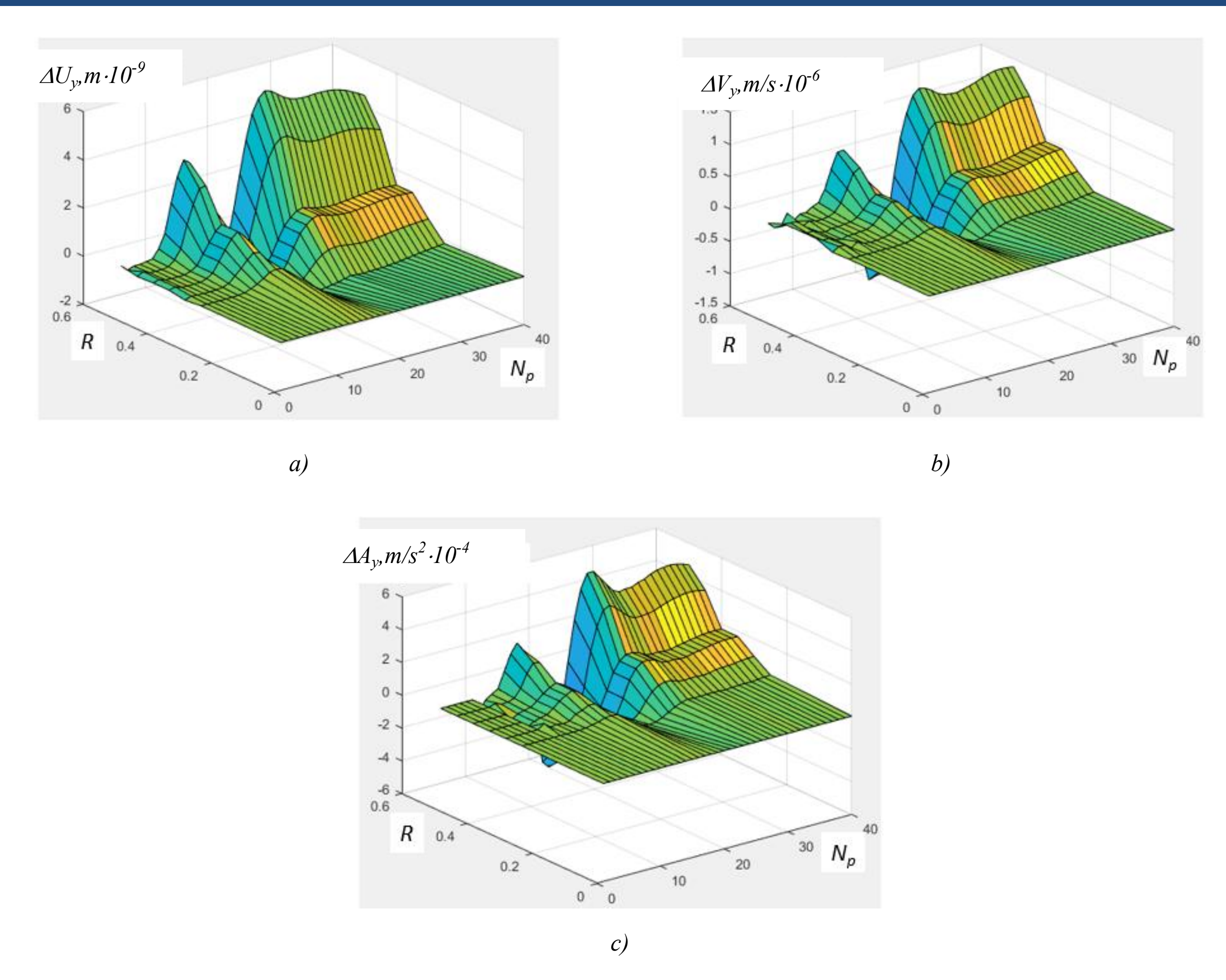


Рис. 6. Относительные значения амплитуд смещения ΔU_y *(a)*, скорости ΔV_y *(b)* и ускорения ΔA_y *(c)* для точек $N_p=1–40$ на поверхности конструкции и варианта радиуса R_i дефекта

Центр дефекта располагался под точкой P_{20}. Анализ данных графиков показывает, что слева и справа в окрестностях дефекта возникают перегибы кривых максимальных амплитуд колебаний относительных значений перемещения ΔU_y, скорости ΔV_y и ускорения ΔA_y. Эта тенденция сохраняется при всех вариациях радиуса дефекта R_i. Этот признак тем самым может являться показателем локации дефекта. Такие эффекты на практике возможно достичь путем позиционного сканирования при регистрации и обработке амплитуд колебаний. Кривые относительных показателей перемещения, скорости и ускорения в окрестности дефекта достаточно хорошо коррелируют с величиной дефекта.

Применение нейросетевых технологий в задаче идентификации размеров скрытого дефекта. Установим связь между скоростью, ускорением и амплитудами колебаний, распространяющимися в слоистой структуре, и радиусом дефекта R_i. На основе полученных данных на этапе *КЭ* моделирования формируется обучающий набор, с помощью которого обучается построенная модель *ИНС*.

В результате численного решения ряда прямых задач в *КЭ* программном комплексе *ANSYS* были получены данные для 40 точек на поверхности слоистой структуры при вариациях радиуса дефекта R_i с ошибкой при вычислении в пределах *3%*. Для каждого набора из 40 значений был установлен соответствующий радиус дефекта. Подготовленные обучающие вектора в качестве входных значений содержали относительные величины амплитуд колебаний $\Delta U_y(N_{pi})$ скорости $\Delta V_y(N_{pi})$ и ускорения $\Delta A_y(N_{pi})$, а в качестве выходных значений — радиус дефекта. Всего было проведено 100 численных экспериментов. Таким образом, обучающая выборка состоит из 100 векторов для каждого типа исследуемого параметра ΔU_y, ΔV_y и ΔA_y. Все данные, применяемые в обучении нейронной сети, нормализованы и находятся на интервале [0, 1].

Для идентификации радиуса дефектного включения применялась полносвязная многослойная модель *ИНС*, смоделированная в комплексе *Matlab*. Модель *ИНС* содержала 1 слой, состояла из 40 входных нейронов и 1 выходного нейрона. В качестве входной активационной функции выбиралась Sigmoid, а в качестве выходной активационной функции устанавливалась линейная зависимость. Сеть обучалась с помощью алгоритма обратного распространения ошибки на основе оптимизации Левенберга-Марквардта [37].

Функция потерь характеризовалась среднеквадратической ошибкой (*MSE*). Для обучающей и тестовой выборки было построено 100 векторов из показателей относительных величин амплитуд колебаний ΔU_y,

скорости ΔV_y и ускорения ΔA_y. Найдена корреляции данных параметров к радиусу дефекта. Установлено, что 8, 10 и 20 эпох обучения для соответствующих показателей достаточны для достижения необходимого уровня качества работы *ИНС. На* рис. 7 приведена зависимость средне-квадратической ошибки от количества эпох обучения модели *ИНС.* Анализ показывает, что при достижении обучения более 8 эпох для всех относительных параметров амплитуд колебаний средне-квадратическая ошибка (*MSE*) изменяется незначительно.

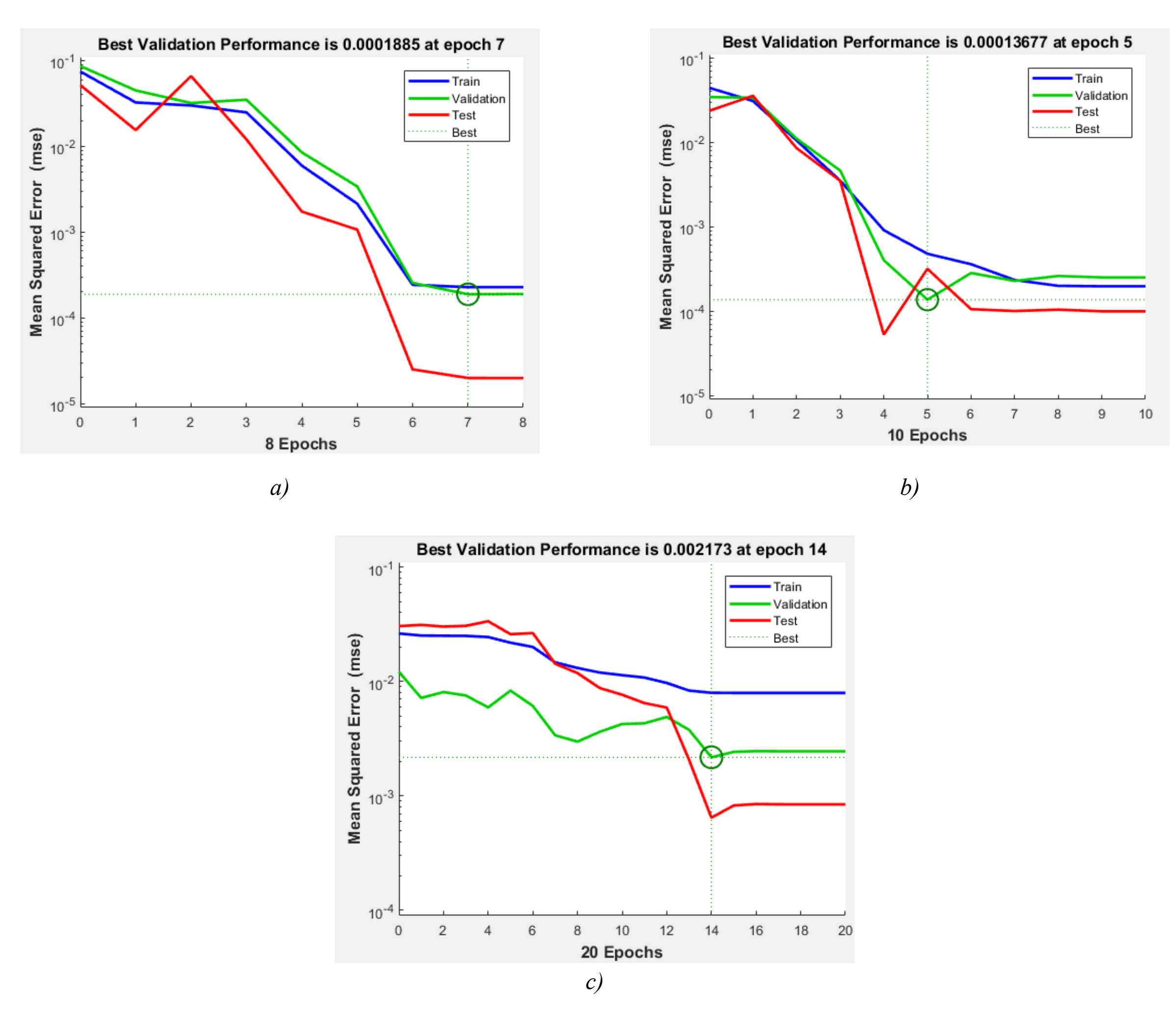


Рис. 7. Изменение средне-квадратической ошибки *(MSE)* работы *ИНС* в процессе её обучения на основе значений относительных величин колебаний: *а* — амплитуд ΔU_y, *b* — скорости ΔV_y и *c* — ускорения ΔA_y

Таблица 2

Оценка точности вычислений

Используемая *ИНС*	Относительная ошибка, %
ΔU_y	0,50
ΔV_y	3,03
ΔA_y	16,70

Тестирование полученных зависимостей *ИНС.* Для выборочной оценки восстановления показателя радиуса дефекта R_i были выполнены наборы из параметров амплитуд колебаний и получены их относительные значения. Графическое отображение результатов трех тестовых наборов для относительных величин амплитуд колебаний ΔU_y *(a)*, скорости ΔV_y *(b)* и ускорения ΔA_y *(c)* представлены на рис. 8. Данные показатели наборов подставляли в соответствующую *ИНС* и вычисляли значения радиуса дефекта. В таблице 2 приведена рассчитанная погрешность восстановленного радиуса *R* дефекта. Анализ показывает, что наименее точным является восстановление радиуса по параметрам ускорения. При этом средняя относительная ошибка восстановления параметра радиуса *R* дефекта на основе данных амплитуд колебаний ΔU_y и скорости ΔV_y не превосходит 5%.

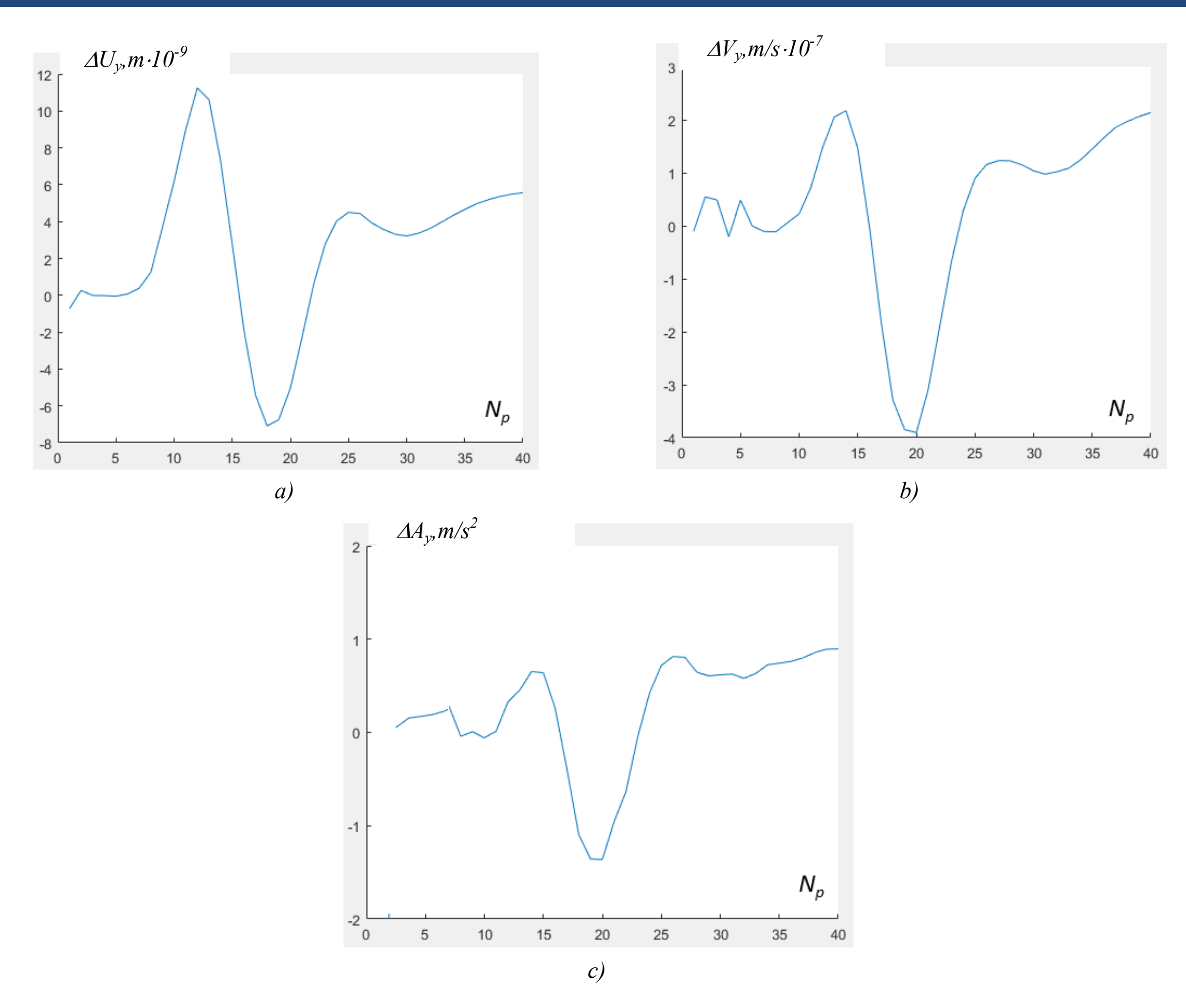


Рис. 8. Набор рассчитанных относительных величин амплитуд колебаний ΔU_y *(a)*, скорости ΔV_y *(b)* и ускорения ΔA_y *(c)*

Обсуждение и заключения. Рассмотрена задача о восстановлении радиуса дефекта на основе применения имитационного моделирования колебаний в конечно-элементном комплексе *ANSYS* и *ИНС* в комплексе *MATLAB*. Получены результаты нестационарных колебаний полуплоскости с круглым внутренним дефектом. Вычислены поперечные смещения в контрольных точках конструкции при распространении волны от импульсного нагружения. В результате был разработан подход к восстановлению радиуса дефекта в конструкции на основе сочетания метода конечных элементов и *ИНС*. Наиболее удачная конфигурация архитектуры *ИНС*, состоящей из 1 скрытого и 1 выходного слоев, включала 40 входных нейронов и 1 выходной нейрон.

Исследование показало, что использованного объема данных достаточно для успешного обучения построенной модели и проведения идентификации скрытого дефекта конструкции. При этом относительная точность определения радиуса дефекта внутри слоя 1, в случае применения значений амплитуд колебаний перемещения и скорости, составляет более 99 %.

Таким образом построенные *ИНС*-алгоритмы могут успешно применяться для оценки стратификации слоистых конструкций при использовании временного и позиционного сканирования при возбуждении колебаний из дальней зоны.

Библиографический список

1. Неразрушающие методы контроля / под ред. В. Я. Кершенбаума. — Москва : Наука и техника. — 1992. — 656 с.

2. Белокур, И. П. Дефектология и неразрушающий контроль / И. П. Белокур. — Киев : Выща школа. — 1990. — 208 с.

3. Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций / В. А. Акопьян, А. В. Черпаков, Е. В. Рожков, А. Н. Соловьев // Контроль. Диагностика. — 2012. — № 7. — С. 50–56.

4. Капцов, А. В. Определение параметров плоской эллиптической трещины в изотропном линейно упругом теле по результатам одного испытания на одноосное растяжение / А. В. Капцов, Е. И. Шифрин,

П. С. Шушпанников // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2012. — № 4. — С. 71–88.

5. Sedov, A. V. Adaptive-spectral method of monitoring and diagnostic observability of static stresses of elements of mechanical constructions / A. V. Sedov, V. V. Kalinchuk, O. V. Bocharova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — 87(8). — P. 082043.

6. Соловьев, А. Н. Ультразвуковая локация внутренних трещи ноподобных дефектов в составном упругом цилиндре с применением аппарата искусственных нейронных сетей / А. Н. Соловьев, Б. В. Соболь, П. В. Васильев // Дефектоскопия. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 3–9.

7. Xia, J. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves / J. Xia, R. D. Miller, C. B. Park // Geophysics. — 1999. — Vol. 64, no. 3. — P. 691–700.

8. Esipov, Y. V. Criteria for identification of stress state of periodic rod construction based on ferroelectric sensors of deformation / Y. V. Esipov, V. M. Mukhortov, I. I. Pojda // Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. — 2012. — P. 283−291.

9. Evtushenko, S. I. Identification of soils, grounds and lands strata using the acoustic spectral analysis / S. I. Evtushenko, V. A. Lepikhova, N. V. Lyashenko [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 913. — P. 052043. DOI:10.1088/1757-899X/913/5/052043

10. Ильгамов, М. А. Диагностика повреждений балки на шарнирных опорах / М. А. Ильгамов, А. Г. Хакимов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2010. — № 2. — С. 42–48.

11. Park, C. B. Combined use of active and passive surface waves / C.B. Park, R.D. Miller, N. Ryden [et al.] // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. — 2005. — Vol. 10, no. 3. — P. 323−334.

12. Brigante, M. Acoustic Methods for the Nondestructive Testing of Concrete: A Review of Foreign Publications in the Experimental Field / M. Brigante, M. A. Sumbatyan // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2013. — Vol. 49, no. 2. — P. 100–111.

13. Park, C. B. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW) / C. B. Park, R. D. Miller // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. — 2008. — Vol. 13, no. 1. — P. 1–11.

14. Lyapin, A. A. Improving Road Pavement Characteristics / A. A. Lyapin, I. A. Parinov, N. I. Buravchuk [et al.] // Springer, Cham. — 2020. — 254 p. DOI: 10.1007/978-3-030-59230-1

15. Haykin, S. Neural Networks: a comprehensive foundation / S. Haykin. — 2nd ed. — Prentice Hall. — 1998. — 842 p.

16. Krasnoshchekov, A. A. Identification of crack-like defects in elastic structural elements on the basis of evolution algorithms / A. A. Krasnoshchekov, B. V. Sobol, A. N. Solov'ev [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2011. — 47(6). — 412−419.

17. Waszczyszyn, Z. Neural networks in mechanics of structures and materials – new results and prospects of applications / Z. Waszczyszyn, L. Ziemianski // Computers and Structures.— 2001. — Vol. 79, iss. 22−25. — P. 2261−2276.

18. Зиновьев, А. Ю. Визуализация многомерных данных / А. Ю. Зиновьев. — Красноярск : Изд-во Красноярского государственного технического университета. — 2000. — 180 с.

19. Liu, S.W. Detection of cracks using neural networks and computational mechanics / S.W. Liu, J.H. Huang, J.C. Sung [et al.] // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 2002. — Vol. 191, iss. 25−26. — P. 2831−2845. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00221-9

20. Khandetsky, V. Signal processing in defect detection using back-propagation neural networks / V. Khandetsky, I. Antonyuk // NDT&E International. — 2002. — Vol. 35, iss. 7. — P. 483−488.

21. Xu, Y.G. Adaptive multilayer perceptron networks for detection of cracks in anisotropic laminated plates / Y.G. Xu [et al.] // International Journal of Solids and Structures. — 2001. — Vol. 38. — P. 5625−5645.

22. Fang, X. Structural damage detection using neural network with learning rate improvement / X. Fang, H. Luo, J. Tang // Computers and Structures. — 2005. — Vol. 83. — P. 2150–2161.

23. Hernandez-Gomez, L. H. Locating defects using dynamic strain analysis and artificial neural networks / L. H. Hernandez-Gomez, J. F. Durodola, N. A. Fellows [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2005. — Iss. 3−4. — P. 325−330.

24. Soloviev, A. Identification of crack-like defect and investigation of stress concentration in coated bar / A. Soloviev, B. Sobol, P. Vasiliev // In: Springer Proceedings in Physics. — 2019. — Iss. 4. — P. 165−174.

25. Pozharskii, D.A. Periodic crack system in a layered elastic wedge / D.A. Pozharskii, V.N. Sobol', P.V. Vasil'ev // Mechanics of Advanced Materials and Structures. — 2020. — Vol. 27(4). — P. 318−324.

26. Cherpakov, A.V. The Study of Stratification of Multilayer Structures Based on Finite Element Modeling and Neural Network Technologies / A. V. Cherpakov, P. V. Vasiliev, A. N. Soloviev [et al.] // Advanced Materials. Proc. Int. Conf. on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications, PHENMA 2019. — 2020. — P. 439−447. DOI: 10.1007/978-3-030-45120-2

27. Ватульян, А. О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела / А. О. Ватульян. — Москва : Физматлит. — 2007. — 224 с.

28. Многократное рассеяние ультразвуковых волн на системе пространственных дефектов канонической формы (теория и эксперимент) / Н. В. Боев, Х. М. Эль-Мараби, В. А. Вдовин, В. М. Зотов // Вестник Донского государственного технического университета. — 2012. — № 12 (3). — С. 5–10.

29. Lyapin, A. Structural Monitoring of Underground Structures in Multi-Layer Media by Dynamic Methods / A. Lyapin, A. Beskopylny, B. Meskhi // Sensors. — 2020. — 20(18). — P. 5241. DOI: 10.3390/s20185241

30. Идентификация параметров повреждений в упругом стержне с использованием конечно-элементного и экспериментального анализа мод изгибных колебаний / А. В. Черпаков, В. А. Акопьян, А. Н. Соловьев [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 3 (54). — С. 312–318.

31. Cherpakov, A.V. Simulation of wave processes in the multilayer structure surface layer properties identification by the finite element method / A. V. Cherpakov, O. V. Shilyaeva, M. N. Grigoryan [et al.] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. — 2019. — Vol.698. — P. 066021.

32. Cogranne, R. Statistical detection of defects in radiographic images using an adaptive parametric model / R. Cogranne, F. Retraint // Signal Processing. — 2014. — Vol. 96, part B. — P. 173−189.

33. Ватульян, А. О. Поперечные колебания балки с локализованными неоднородностями. / А. О. Ватульян, А. В. Осипов // Вестник Донского государственного технического университета. — 2012. — №12(8). — С. 34–40.

34. Shevtsov, S. N. Piezoelectric Actuators and Generators for Energy Harvesting / S. N. Shevtsov, A. N. Soloviev, I. A. Parinov [et al.] // Heidelberg, Springer. — 2018. — 182 p.

35. Васильченко, К. Е. К расчету амплитудно-частотных характеристик задач об установившихся колебаниях на основе кластерных технологий в ACELAN / К. Е. Васильченко, А. В. Наседкин, А. Н. Соловьев // Вычислительные технологии. — 2005. — Т. 10, № 1. — С. 10–20.

36. 36. Krasil'nikov, V.A. Introduction to Physical Acoustics / V.A. Krasil'nikov, V.V. Krylov // Moscow: Nauka, 1984. — 400 p.

37. Kingma, D. P. Adam: A Method for Stochastic Optimization / D. P. Kingma, J. Ba // Proc. 3rd International Conference for Learning Representation, San Diego. — 2015.

Сдана в редакцию 03.08.2020
Запланирована в номер 14.09.2020

Об авторах:

Соловьев Аркадий Николаевич, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ведущий научный сотрудник лаборатории «Вычислительная механика» ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (344006, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID H-7906-2016, ScopusID 55389991900, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8465-5554, Solovievarc@gmail.com

Васильев Павел Владимирович, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4112-7449, liftzeigen@mail.ru

Черпаков Александр Владимирович, старший научный сотрудник института «Математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича» ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (344090, РФ, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8 а), доцент кафедры «Информационные системы в строительстве» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3205-1577, alex837@yandex.ru

Паринов Иван Анатольевич, ведущий научный сотрудник ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (344090, РФ, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8 а), доктор технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3833-0331, parinov_ia@mail.ru

Кириллова Евгения Вадимовна, профессор Висбаденского университета, Германия (18, Kurt-Schumacher-Ring, Wiesbaden, 65197, Germany), кандидат физико-математических наук, ScopusID: 24402885500.

Заявленный вклад соавторов:

А. Н. Соловьев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования. А. В. Черпаков — проведение расчетов в КЭ пакете, подготовка текста, формирование выводов. И. А. Паринов — научное руководство, анализ результатов исследований. П. В. Васильев — проведение расчетов, доработка текста, корректировка выводов. Е. В. Кириллова — проведение расчетов, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МЕХАНИКА
MECHANICS





Probabilistic design strategy for improved Austin-Moore stem used in artificial cementless hip prosthesis considering material property uncertainty

G. Kharmanda[1], I. R. Antypas[2]
[1] INSA Rouen Normandie (Saint-Etienne-du-Rouvary, France)
[2]Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The use of probabilistic analysis is important when the input data are random, that leads to stochastic results. This paper describes the integration of a probabilistic design strategy of the solid and hollow stems implanted in a proximal femur in order to compare their advantages. The used hollow stem is called “Improved Austin-Moore” (IAM) model.
Materials and Methods. Probabilistic methods allow variations in factors which control the biomechanical effects of the implanted femur to be taken into account while determining its performance. Different material properties were generated randomly using Monte Carlo simulation (MCS). Monte Carlo sampling techniques were applied, and different von Mises stresses of the layers (bone and metal) were chosen as a performance indicator.
Results. A simple 2D implant-bone study of solid and IAM stem design was carried out with a high level of confidence, 99.87%, which corresponds to a target reliability index with regard to statistical uncertainties. The probabilistic design results show that the input and output parameters for the IAM stem are highly correlated relative to those for the solid stem.
Discussion and Conclusions. The sensitivity analysis shows that the input parameters for the IAM stem play a much larger part in the output parameters relative to the solid stem. The IAM stem is much more advantageous than the solid stem which causes an increase in the performance of the hip prosthesis.

Keywords: hip prosthesis, probabilistic analysis, finite element analysis, Monte Carlo simulation, IAM model.

For citation: G. Kharmanda, I. R. Antypas. Probabilistic design strategy for improved Austin-Moore stem used in artificial cementless hip prosthesis considering material property uncertainty. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 216−224. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-216-224



Вероятностная стратегия проектирования усовершенствованного стержня Остина-Мура, используемого в искусственном бесцементном эндопротезе тазобедренного сустава

М. Г. Харманда[1], И. Р. Антибас[2]

[1]INSA Rouen Normandie (Saint-Etienne-du-Rouvary, France (Сент-Этьен-дю-Руврe, Франция)
[2]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. использование вероятностного анализа важно тогда, когда входные данные случайны, что приводит к стохастическим результатам. Эта статья описывает интеграцию вероятностной стратегии проектирования сплошных и полых стержней, имплантируемых в проксимальный отдел бедра, для проведения сравнения их преимуществ. Используемый полый стержень получил название «Улучшенная модель Остина-Мура» (IAM).
Материалы и методы. Вероятностные методы позволяют учитывать различия в факторах, контролирующие биомеханические эффекты имплантированного бедра при определении его эффективности. Различные свойства применяемого материала генерировались случайным образом с помощью метода Монте-Карло (MCS), который также был использован для выборки проб, а в качестве показателя эффективности были выбраны различные напряжения по-Мизесу слоёв (кости и металла).
Результаты. Простое двухмерное исследование кости имплантата со сплошным и IAM-дизайном стержня

проводился с высоким уровнем достоверности — 99,87%, что соответствует целевому индексу надежности с учетом статистической неопределенности. Результаты вероятностного проектирования показывают, что входные и выходные параметры для стержня IAM сильно коррелированы относительно параметров сплошного стержня.
Обсуждение и выводы. Анализ чувствительности показывает, что входные параметры для IAM − стержня играют гораздо более значительную роль в выходных параметрах по сравнению со сплошным стержнем. Стержень IAM намного более выгоден, чем стержень сплошного сечения, что приводит к повышению производительности протеза тазобедренного сустава.

Ключевые слова: протез бедра, вероятностный анализ, анализ методом конечных элементов, моделирование по методу Монте-Карло, модель IAM.

Для цитирования: Харманда, М. Г. Вероятностная стратегия проектирования усовершенствованного стержня Остина-Мура, используемого в искусственном бесцементном эндопротезе тазобедренного сустава / М. Г. Харманда, И. Р. Антибас // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, №3. — С. 216−224. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-216-224

1. Introduction

In probabilistic studies on Total Hip Replacement (THR) models, several important random parameters may affect the hip performance, such as the geometrical description of the bone, the implant and the cement, the material properties of different layers, the magnitude and direction of the applied loads, and the position of the bone-implant [1, 2]. In order to improve the stem design, several points have been considered. At the first stage, the rectangular section stem is considered more reliable than the circular section stem [3]. The rectangular section stem then provides a secure diaphyseal press-fit in the frontal plane of the femoral canal. This way it allows excellent rotational stability and improves the primary mechanical fixation [1]. In addition, wear as mentioned in Kharmanda and Albashi [4] can be reduced. At the second stage, the shouldered stem is considered more reliable than the non-shouldered one. It has been shown in the numerical results of Kharmanda, et al. [5], that, when considering the shouldered stem, there is an excellent decrease of the maximum values on von Mises stress in different bone layers compared to the non-shouldered one. At the third stage, the hollow stems are considered. In Kharmanda [6], a multi-objective structural optimization strategy has been integrated into Austin-Moore prosthesis in order to improve its performance. The resulting model was called Improved Austin-Moore (IAM). The topology optimization was considered as a conceptual design stage to sketch the IAM stem according to the daily loading cases. The shape optimization presented the detailed design stage considering several objectives. A new multiplicative formulation has been proposed as a performance scale to define the best compromise between several requirements. In this paper, a probabilistic design strategy is applied on two kinds of stems (solid and IAM stems) to determine the mechanical effects, the response sensitivities with respect to input parameters, and the correlation of the used material properties with different output parameters. A numerical application on a 2D problem is carried out to show the advantages of the IAM stem relative to the solid one.

2. Material and methods

2.1 Model description and material properties

Fig. 1 *a* and *b* show 2D sections for the studied solid and IAM stems implanted in bone layers (cortical bone and cancellous bone). The bone materials are generally anisotropic [7]. In the current study, the material properties of bone have been for simplicity considered as linearly elastic and isotropic. In Fig. 1, the cortical bone material is considered to be homogeneous and isotropic with Young's modulus $E = 17$ GPa and Poisson's ratio $\nu = 0.33$. The corresponding number of elements for the cortical region is 605 elements for the solid stem model, while it is 545 elements for the IAM stem model. The cancellous bone material is also considered to be homogeneous and isotropic with Young's modulus $E = 386$ MPa and Poisson's ratio $\nu = 0.33$ [8]. The corresponding number of elements for the cancellous region is 417 elements for the solid stem model, while it is 418 elements for the IAM stem model. The modulus of titanium alloy of stem is considered to be: $E = 110$ GPa with Poisson's ratio: $\nu = 0.3$ [9]. The corresponding number of elements for the metal region is 529 elements for the solid stem model, while it is 861 elements for the IAM stem model. The used element is PLANE82 (8-node, nonlinear). The number of the total nodes is 5048 nodes for the solid stem model, while it is 6094 nodes for the IAM stem model.

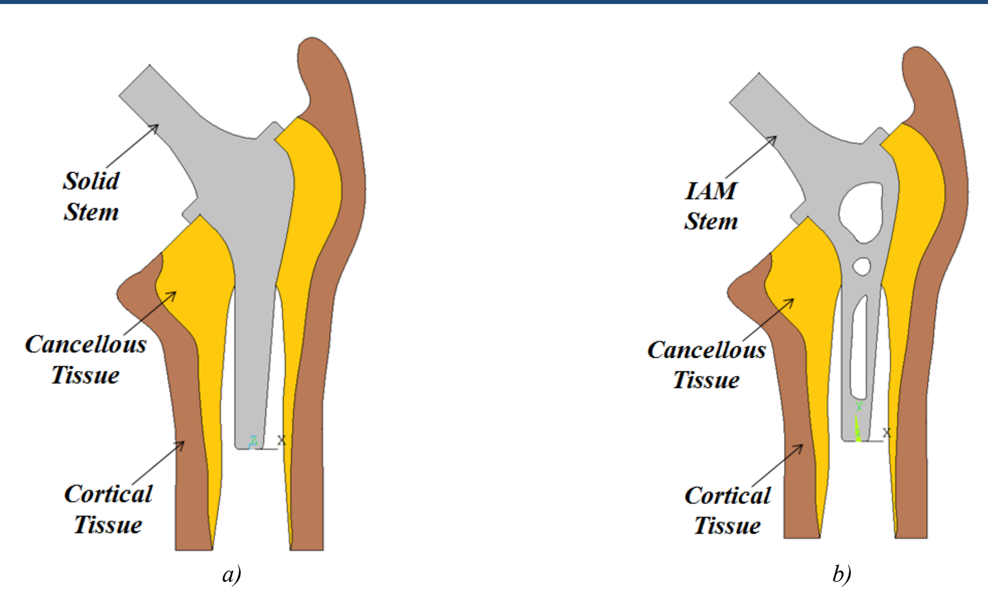


Fig 1. Geometry models for: *a*) solid stem and; *b*) IAM one

2.2 Boundary conditions

The loading cases are considered as daily loading conditions [10]: one-legged stance (L1), extreme ranges of motion of abduction (L2), and adduction (L3) as shown in Fig. 2.

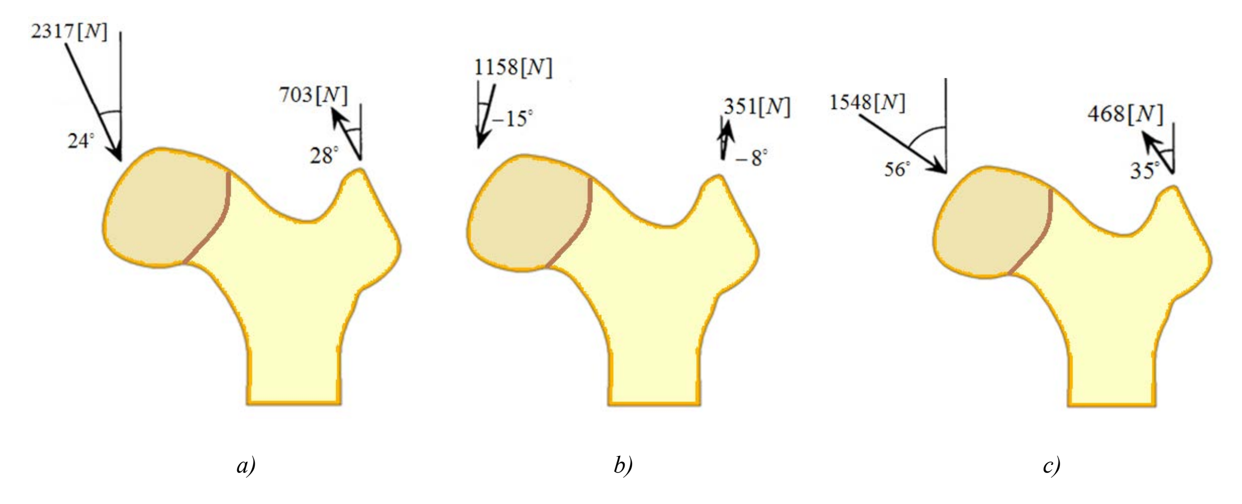


Fig. 2. Loading cases: *a*) One-legged stance case (L1); *b*) Abduction case (L2); and *c*) Adduction case (L3)

Table 1 presents different components of the three loading cases (L1, L2 and L3) which are illustrated in Fig. 1.

Table 1

Force components

Loading Case	Body Forces		Muscle Forces	
	F_x^B [N]	F_y^B [N]	F_x^M [N]	F_y^M [N]
L1	942.41	-2116.68	-330.04	620.71
L2	-299.71	-1118.54	48.85	347.58
L3	1283.35	-865.63	-268.43	383.36

According to the results of Kharmanda [6], the third loading case (L3) leads to the highest von Mises stress values in the bone tissues. Thus, in this work, a probabilistic design strategy is performed considering the third loading case L3.

2.3 Probabilistic design strategy

2.3.1 Failure probability

The design of structures and the prediction of their good performance lead to the confirmation of a certain number of rules depending on the knowledge of physical and mechanical experience of designers. Thus, there are

several events leading to a failure mode. It is the objective to evaluate the probability of failure corresponding to the occurrence of critical failure scenarios. The probability of failure is then given by:

$$P_f = \Pr\left[G(\mathrm{x},\mathrm{y})\right] = \int_{G(\mathrm{x},\mathrm{y})\le 0} f_Y(\mathrm{y})dy_1...dy_n \quad (1)$$

where $G(\mathrm{x},\mathrm{y})$ is a limit state surface (curve) that is defined by the condition of good structural performance [11]. The limit state surface (curve) $G(\mathrm{x},\mathrm{y})=0$ is located between the failure part $G(\mathrm{x},\mathrm{y})<0$ and the safety part $G(\mathrm{x},\mathrm{y})>0$. $f_Y(\mathrm{y})$ is the density function of the random parameter Y. Several techniques can be used to compute the probability of failure. Monte Carlo Simulation (MCS) is the most conservative probability technique [12]. Here, the parameters are sampled at random from their underlying distributions and the probability of failure which is estimated by solving the model repeatedly. For all time, the MCS gives the correct solution if a sufficient number of trials is computed, but it requires a high computing time. In order to decrease this expense, and avoid overlapping of samples and/or lack of samples in some regions of the domain, another technique called Latin Hypercube Sampling (LHS) can be applied [13]. The MCS based approach divides the sample space into separate intervals with equal probabilities, and one sample is randomly taken from each interval. When considering implicit models, finite element analysis has been combined with probabilistic design methods in order to allow uncertainty in the system parameters to be taken into account. Several types of uncertainties can be distinguished:

— Physical uncertainty: For example: material properties, dimensions, loading, etc.;
— Statistical uncertainty: Due to limited sample sizes, probabilistic model is considered uncertain;
— Model uncertainty: For example, mathematical models, numerical approaches due to simplifying assumptions, unknown boundary conditions, and unknown effects of other variables that are not included in the model.

2.3.1 Reliability index

The reliability is the inverse of failure probability. The relationship between the reliability R is related with the failure probability, it can be written as follows:

$$P_f = 1 - R \quad (2)$$

To estimate the reliability index, several techniques have been developed during the last five decades, namely FORM (First Order Reliability Methods), SORM (Second Order Reliability Method) and simulation techniques [11, 14]. In FORM approximation, the probability failure is simply evaluated by

$$P_f \approx \Phi(-\beta) \quad (3)$$

where $\Phi(\bullet)$ is the standard Gaussian cumulated function calculated through the following integral:

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (4)$$

For practical engineering applications, Eq. (3) gives sufficiently accurate estimation of the failure probability. In general, the nuclear and spatial studies necessitate very small values of failure probability, the failure probability should be: $P_f \in [10^{-6} - 10^{-8}]$ that corresponds to a reliability index $\beta \in [4.75 - 5.6]$ when using equations 3 and 4; while in structural engineering studies, the failure probability should be: $P_f \in [10^{-3} - 10^{-5}]$ that corresponds to a reliability index $\beta \in [3 - 4.25]$ (A detailed study on target safety indices can be found in Jeppsson [15]. In the next section, a simple 2D implant-bone study of solid and IAM stem designs is presented with account for statistical uncertainties.

3. Results

The Probabilistic Design System in ANSYS software analyzes a component or a system involving uncertain input parameters. The input parameters concerning geometry, material properties, boundary conditions, etc., are defined in ANSYS software. The variation of these input parameters is considered as random input variables and is characterized by their distribution type (normal, lognormal, etc.), as well as their distribution parameters (mean values, standard deviation, etc.). The important responses are defined as random output parameters. During a probabilistic study, the software executes multiple analysis loops to compute random output parameters as a function of a set of random input variables. The values for the input variables are generated randomly using Monte Carlo simulation.

The studied model has six parameters that are regarded as random input parameters. Thus, six sources of uncertainty were considered in the present investigation: E_{Can}, E_{Cor}, E_M, ν_{Can}, ν_{Cor} and ν_M. These sources are Young's modulus and Poisson's Ratio for the three studied layers (cortical, cancellous and metal layers). According to several references in the literature [16, 17], the maximum and the minimum values of Young's modulus are respectively 19.7 GPa and 10.4 GPa for the cortical tissue, 5.6 GPa and 192 MPa for the cancellous tissue, and 120 GPa and 100 GPa for the titanium alloy. And the maximum and the minimum values of Poisson's ratio are respectively 0.33 GPa and 0.3 GPa

for the cortical tissue and for the cancellous tissue, while they are: 0.36 and 0.3 for the titanium alloy. It is considered that the input parameters follow the uniform distribution law. To assess the accuracy of the results, it is performed with a high confidence interval of 99.87% (reliability level). The failure probability is noted to be 0.13% which corresponds to a reliability index equal to $\beta = 3$ (Equations 3 and 4). Using Sampling Method, Monte Carlo based simulations were run, with 30000 simulations for the third loading case (L3) on the solid and IAM stems. A sensitivity analysis was performed to assess the influence of each parameter on the maximum von Mises stress values for the cortical and cancellous bone, and for the metal ($\sigma^1_{\max}$, $\sigma^2_{\max}$ and $\sigma^M_{\max}$). The evaluation of the sensitivities was based on both Rank-order correlation coefficients between the input parameters and the output parameters.

Table 2

Statistics of the random input and output parameters for solid stem

Parameter	Mean	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis	Minimum	Maximum
E_{Can} (MPa)	2896	1561	-1.73×10^{-7}	6.65×10^{4}	192.1	5600.
E_{Cor} (MPa)	1.51×10^{4}	2685	2.06×10^{-7}	6.65×10^{4}	1.04×10^{4}	1.97×10^{4}
E_M (MPa)	1.10×10^{5}	5774	2.36×10^{-7}	6.65×10^{4}	1.00×10^{5}	1.20×10^{5}
ν_{Can}	0.3150	8.66×10^{-3}	-5.96×10^{-7}	6.65×10^{4}	0.3000	0.3300
ν_{Cor}	0.3150	8.66×10^{-3}	1.39×10^{-6}	6.65×10^{4}	0.3000	0.3300
ν_M	0.3300	1.73×10^{-2}	5.56×10^{-7}	6.65×10^{4}	0.3000	0.3600
$\sigma^1_{\max}$ (MPa)	16.93	1.783	1.992	2.49×10^{5}	14.81	25.06
$\sigma^2_{\max}$ (MPa)	7.057	0.7837	2.311	3.34×10^{5}	6.333	11.24
$\sigma^M_{\max}$ (MPa)	11.28	1.44×10^{-2}	-1.42×10^{-2}	6.65×10^{4}	11.26	11.31

Tables 2 and 3 show the statistical results of the random input and output parameters for the solid stem and for the IAM stem, respectively.

Table 3

Statistics of the random input and output parameters for the IAM stem

Parameter	Mean	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis	Minimum	Maximum
E_{Can} (MPa)	2896	1561	-1.57×10^{-7}	6.65×10^{4}	192.0	5600.
E_{Cor} (MPa)	1.51×10^{4}	2685	1.71×10^{-7}	6.65×10^{4}	1.04×10^{4}	1.97×10^{4}
E_M (MPa)	1.10×10^{5}	5774	3.08×10^{-7}	6.65×10^{4}	1.00×10^{5}	1.20×10^{5}
ν_{Can}	0.3150	8.66×10^{-3}	5.64×10^{-7}	6.65×10^{4}	0.3000	0.3300
ν_{Cor}	0.3150	8.66×10^{-3}	-5.93×10^{-7}	6.65×10^{4}	0.3000	0.3300
ν_M	0.3300	1.73×10^{-2}	3.34×10^{-8}	6.65×10^{4}	0.3000	0.3600
$\sigma^1_{\max}$ (MPa)	16.92	1.822	1.963	2.43×10^{5}	14.76	25.18
$\sigma^2_{\max}$ (MPa)	7.081	0.7954	2.295	3.28×10^{5}	6.345	11.33
$\sigma^M_{\max}$ (MPa)	11.30	1.18×10^{-2}	-1.78×10^{-2}	6.65×10^{4}	11.28	11.32

Fig. 3 shows the probability density function histograms of output parameters. Fig. 3*a* and *b* show the histograms of the maximum von Mises stress value ($\sigma^1_{\max}$) for the solid stem, and the IAM stem, respectively. Fig. 3*c* and *d* show the histograms of the maximum von Mises stress value ($\sigma^2_{\max}$) for the solid stem, and the IAM stem, respectively. Fig. 3*e* and *f* show the histograms of the maximum von Mises stress value ($\sigma^M_{\max}$) for the solid stem, and

the IAM stem, respectively. The probability density function calculates an appropriate number of classes based on the number of samples. The number of classes is equal to the number of bars which are presented in the histogram. The distance between the smallest and largest sample value is divided into classes of equal width. A histogram is modeled by counting the number of hits in the individual classes and dividing this number by the total number of samples. Thus, a histogram represents the relative frequencies of the random quantity that is drawn for.

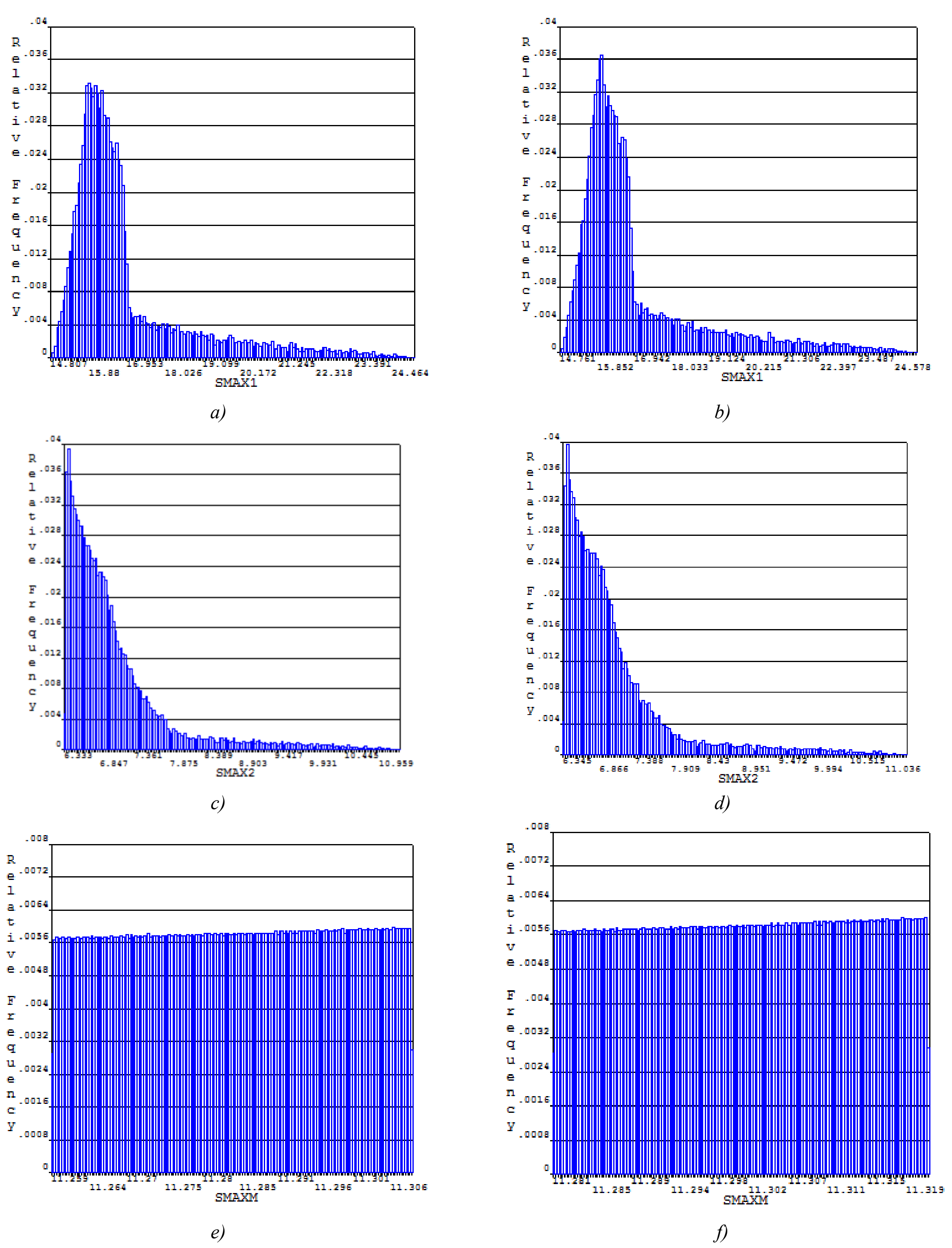


Fig. 3. Histograms of the output parameters: σ^1_{max} for *a*) solid stem; *b*) IAM stem; σ^2_{max} for; *c*) solid stem; *d*) IAM stem; σ^M_{max} *e*) solid stem, and *f*) IAM stem.

Fig. 4 shows the sensitivity evaluation of the output parameter with respect to the input random variables: Fig. 4*a* and *b* show the sensitivities of the maximum von Mises stress value (σ^1_{max}) for the solid stem, and the IAM

stem, respectively. Fig. 4*c* and *d* show the sensitivities of the maximum von Mises stress value ($\sigma^2_{\max}$) for the solid stem, and the IAM stem, respectively. Fig. 4*e* and *f* show the sensitivities of the maximum von Mises stress value ($\sigma^M_{\max}$) for the solid stem, and the IAM stem, respectively. The sensitivities of a certain random output parameter are modeled. The random input parameters are separated into two types: significant parameters and insignificant parameters. The sensitivity plots include only the significant random input parameters.

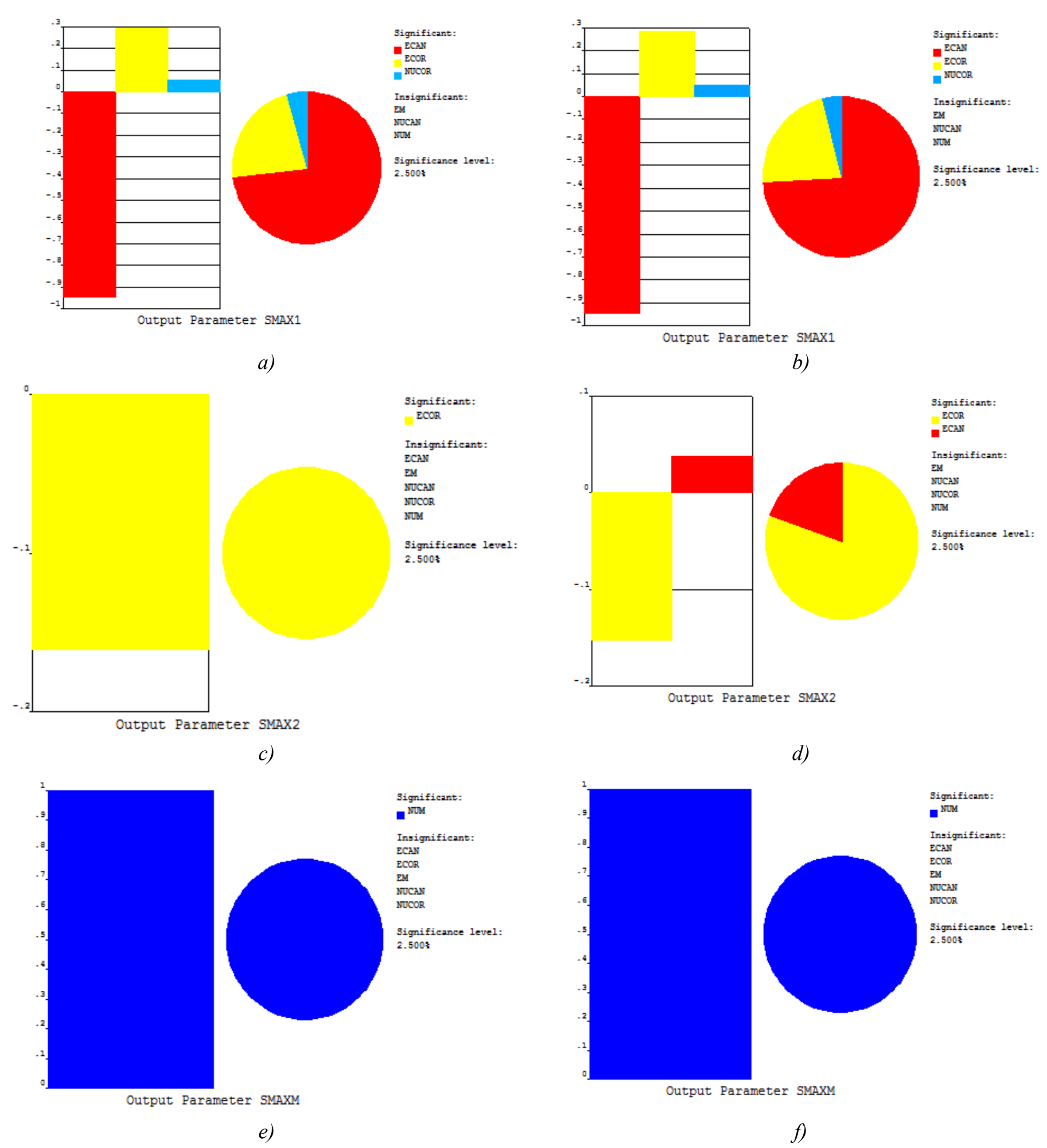


Fig. 4. Sensitivities of the output parameters: $\sigma^1_{\max}$ for *a*) solid stem; *b*) IAM stem; $\sigma^2_{\max}$; *c*) solid stem; *d*) IAM stem; and $\sigma^M_{\max}$ for *e*) solid stem; *f*) IAM stem

Table 4 shows the correlation coefficients between the input and output parameters for the solid and IAM stems. Here, it is shown the statistical interdependence between the input and output parameters. The values being closer to zero show that the two parameters are weakly correlated. However, the values being closer to 1 or -1, show that the two variables are highly correlated either in positive or negative sense, respectively.

Table 4

Correlation coefficients between the input and output parameters for solid and IAM stems

Parameters	Solid stem			IAM stem		
	σ^1_{max} (MPa)	σ^2_{max} (MPa)	σ^M_{max} (MPa)	σ^1_{max} (MPa)	σ^2_{max} (MPa)	σ^M_{max} (MPa)
E_{Can} (MPa)	-0.799	-0.320	---	-0.801	-0.304	0.010
E_{Cor} (MPa)	0.191	-0.038	-0.002	0.187	-0.036	0.003
E_M (MPa)	0.002	0.004	0.007	0.001	-0.001	0.010
ν_{Can}	-0.006	---	0.004	-0.006	-0.002	-0.008
ν_{Cor}	0.025	---	-0.011	0.025	0.004	-0.004
ν_M	-0.004	-0.006	1.000	-0.007	-0.003	1.000

4. Discussion. In this work, a probabilistic design strategy is established to compare in details the role of different input and output parameters considered when designing the solid and hollow (IAM) stems. Monte Carlo technique is used as a robust tool with a big number of simulations to provide with accurate results. The histograms of the probability density function of three output parameters are presented. The three output parameters have three different distribution forms: The maximum von Mises stress values for the cortical tissue (σ^1_{max}) has the lognormal distribution form. The maximum von Mises stress values for the cancellous tissue (σ^2_{max}) has the exponential distribution form. The maximum von Mises stress values for the metal (σ^M_{max}) has the uniform distribution form. The skewness values of the input values (asymmetry) for the IAM stem differ from those for the solid stem, while there is no big difference when considering the output parameters. The sensitivity analysis for the output parameters with respect to the input random variables is next carried out in order to determine the input parameter influence. Three input parameters (E_{Can}, E_{Cor} and ν_{Cor}) have different roles on the maximum von Mises stress values for the cortical tissue (σ^1_{max}). Here, there is a small difference when comparing the diagram for the solid and IAM stems. For the maximum von Mises stress values for the cancellous tissue (σ^2_{max}), two input parameters (E_{Cor} and E_{Can}) play significant roles when considering the IAM stem, while only one input parameter (E_{Cor}) when considering the solid stem. For the maximum von Mises stress values for the metal (σ^M_{max}), only one input parameter (ν_M) has a significant influence for the solid and IAM stems. According to the correlation study, the correlation coefficients between the input parameters and the output ones for the IAM stem are much higher than those for the solid stem where several values are closer to zero. According to the presented probabilistic design strategy, the IAM stem has several advantages relative to the solid one.

5 Conclusion. A probabilistic design strategy is applied to find different probabilistic bounds with high reliability (confidence) levels. The results show that the IAM stem is much more advantageous than the solid stem especially. This study was limited to a 2D modeling in order to reduce the computing time since 30000 simulations were performed. However, in future work, it is recommended to perform a 3D modeling and to deal with anisotropy behavior for bone tissues.

References

1. Gonzalez CD. Probabilistic Finite Element Analysis of Un-cemented Total Hip Replacement, PhD thesis. School of Engineering Sciences, Bioengineering Sciences Research Group: University of Southampton; March 2009.

2. Kharmanda G, Antypas I. Reliability-based design algorithm for artificially replaced hip prosthesis considering material property uncertainty. Journal of Advances in Engineering Research, AER. 2018. Advances in Engineering Research (AER). 2018;157:44−50. https://www.atlantis-press.com/proceedings/aime-18/25901891

3. Kharmanda G, El-Hami A, Ibrahim MH. Integration of reliability and optimization concepts into orthopedic prosthesis design: Application on hip prosthesis design. Journal of Uncertainties and Reliability of Multiphysical Systems. 2017. DOI: 10.21494.ISTE.OP.2017.0120

4. Kharmanda G, Albashi L. Numerical Study for Increasing Efficiency of Artificially Un-cemented Hip Joint. Research Journal of Aleppo University, Engineering Science Series. 2011;101:47−64.

5. Kharmanda G, Mulki S, Sabsabi Y. Compter-Aided Design of Internal Replacement Models in Orthopedics Surgery. Research Journal of Aleppo University, Engineering Science Series. 2012;105:312−328.

6. Kharmanda G. Integration of multi-objective structural optimization into cementless hip prosthesis design: Improved Austin-Moore model, Computer Methods. Biomechanics and Biomedical Engineering. 2016;19(14):1557-1566. DOI: 10.1080/10255842.2016.1170121

7. Mackerle J. Finite element modeling and simulations in orthopedics. Bibliography 1998–2005, J. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2006; 9(3):149–199. DOI: 10.1080/10255840600751523

8. Senapati S-K, Pal S. UHMWPE-alumina Ceramic Composite. A Proposed Metal Substitute for Artificially Replaced Hip Joint. IE (I) Journal MC. 2005;85:157−162. https://www.researchgate.net/scientific-contributions/2092553592_SK_Senapati.

9. Shaik SA, Bose K, Cherukuri HP. A study of durability of hip implants. Materials and Design. 2012;42:230–237. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.05.049

10. Beaupré GS, Orr TE, Carter DR. An approach for time-dependent bone modeling and remodeling-application: a preliminary remodeling simulation. Journal of Orthopaedic Research. 1990;8(5):662–670. DOI: http://dx.doi.org/10.1002/jor.1100080507

11. Kharmanda G, El-Hami A. Reliability Concept. Reliability in Biomechanics. 2016:63−112. DOI: 10.1002/9781119370840.ch2 P.

12. Haldar A, Mahadevan S. Probability, reliability and statistical methods. Engineering design. New York, USA: John Willey & Sons; 2000. P. 304. https://books.google.ru/books?id=wZNRAAAAMAAJ&redir_esc=y

13. McKay MD, Beckman RJ, Conover WJ. A comparison of three methods for selecting values of input variables. The analysis of output from a computer code. Technometrics. 1979;42:55–61. DOI: 10.1080/00401706.1979.10489755

14. Kharmanda G, Antypas I. Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design. Vestnik of Vestnik of Don State Technical University. 2015;15(2):22−31. DOI: https://doi.org/10.12737/11610

15. Jeppsson J. Reliability-based assessment procedures for existing concrete structures: PhD dissertation. Division of Structural Engineering, Lund University. 2003. P. 199.

16. Cheal E, Spector M, Hayes W. Role of loads and prosthesis material properties on the mechanics of the proximal femur after total hip arthroplasty. Journal of Orthopaedic Research. 1992;10(3):405−422. DOI: http://dx.doi.org/10.1002/jor.1100100314

17. Kayabasi O, Ekici B. Probabilistic design of a newly designed cemented hip prosthesis using finite element method. Materials and Design. 2008;9(5):963−971. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.03.024

Submitted 18.05.2020
Scheduled in the issue 20.07.2020

Authors:

Ghais Kharmanda, Guest Researcher, LMN, INSA Rouen Normandie (St. 685 avenue de l universite BP08, 76801 Saint-Etienne-du-Rouvary, LMN, INSA Rouen Nomandie, France), Cand.Sci. (Eng.)., ResearcherID: O-6690-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8344-9270, g.kharmanda@gmail.com

Imad R. Antypas, associate professor of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.), ResearcherID: O-4789-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8141-9529, Imad.antypas@mail.ru

Claimed contributorship

G. Kharmanda: scientific guidance, statement of the problem, definition of research methodology; collection and analysis of analytical and practical materials on the research topic, critical analysis and finalization of the solution; computer realization of the solution of the problem. I.R. Antypas: analysis of analytical and practical materials on the research topic and analysis of scientific sources on the topic of research, critical analysis and revision of the text.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.791.05:620.17 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-225-234

Аналитическая модель оценки предела выносливости сварных соединений феррито-перлитных сталей

К. А. Молоков, В. В. Новиков, А. П. Герман
ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (г. Владивосток, Российская Федерация)

Введение. Микродефекты и зоны с концентрацией напряжений в сварных соединениях обусловливают появление усталостных макротрещин. Такие повреждения потенциально опасны, особенно если ресурс усталостной прочности конструкции практически исчерпан. В этом случае размер трещины близок к критическому значению, и крайне важно определить ее длину. Статья посвящена разработке инженерной аналитической модели для оценки критической длины трещины и предела выносливости сварных соединений с образовавшимся зерном в структуре феррито-перлитных сталей после сварки.

Материалы и методы. Использованы теория и методы механики разрушения материалов на мезоуровне. Получена простая аналитическая зависимость, позволяющая определить критические размеры макротрещины для феррито-перлитных сталей без использования формулы Гриффитса. Приведены результаты расчета критических длин трещин различных сталей в зависимости от их предела текучести. Представлена аналитическая зависимость расчета предела выносливости для наиболее опасного симметричного цикла нагружения по стандартному набору механических характеристик и среднему диаметру зерна феррито-перлитной стали.

Результаты исследования. Выполнен структурно-деформационный анализ процесса развития трещин. На его базе разработана инженерная методика оценки предела выносливости. Создана математическая модель, которая позволяет рассчитывать предел выносливости и критическую длину трещины в элементах сварных конструкций крупногабаритной техники с учетом циклических нагрузок симметричного цикла. С помощью данной модели можно оценить степень чувствительности металла к исходным характеристикам (предел текучести, коэффициент Пуассона, диаметр зерна, относительное сужение, модуль Юнга, коэффициент степенного упрочнения и др.).

Обсуждение и заключение. При напряжениях, соответствующих пределу выносливости стали, сближаются скорости раскрытия критической трещины вершины и берегов. Этот момент энергетически примерно соответствует переходу трещины в нестабильное состояние. Накопление односторонних пластических деформаций приводит к предельному состоянию пластичности области, примыкающей к вершине трещины и лавинообразному или резко ускоренному ее движению. Эта критическая область взаимосвязана с диаметром зерна материала, характеристикой критической пластичности и критическим раскрытием в вершине трещины на пределе выносливости. Предложенные аналитические зависимости могут быть использованы для оценки остаточного ресурса и предела выносливости сварных конструкций, влияния различных факторов на предел выносливости сварных соединений феррито-перлитных сталей, используемых в машиностроении, судостроении, трубопроводном транспорте и др.

Ключевые слова: сварное соединение, феррито-перлитная сталь, длина трещины, предел выносливости, критическая деформация, математическая модель, структурное повреждение.

Для цитирования: Молоков, К. А. Аналитическая модель оценки предела выносливости сварных соединений феррито-перлитных сталей / К. А. Молоков, В. В. Новиков, А. П. Герман // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 225−234. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-225-234



Analytical model for assessing fatigue limit of welded joints of ferritic-pearlitic steels

K. A. Molokov, V.V. Novikov, A. P. German
Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Introduction. Microdefects and zones with stress concentration in welded joints cause fatigue macrocracks. Such damage is potentially dangerous, especially if the fatigue life of the structure is almost exhausted. In this case, the crack size is close to the critical value, and it is crucial to determine its length. The paper considers the development of an engineering analytical model for assessing the critical crack length and endurance limit of welded joints with the formed grain in the structure of ferrite-pearlitic steels after welding.
Materials and Methods. The theory and methods of fracture mechanics at the mesoscale are used. A simple analytical dependence is obtained, which provides determining the critical dimensions of a macrocrack for ferrite-pearlite steels without using the Griffiths formula. . The calculation results of the critical crack lengths of various steels depending on their yield strength are presented. An analytical dependence of the endurance limit calculation for the most dangerous symmetric loading cycle, according to the standard set of mechanical characteristics and the average grain diameter of ferrite-pearlite steel, is presented.
Results. Structural deformation analysis of the crack propagation process has been performed. On its basis, an engineering technique for assessing the endurance limit is developed. A mathematical model that enables to calculate the endurance limit and the critical crack length in the components of welded assemblies of large-sized facilities, considering periodic loads of a symmetrical cycle, is developed. Using this model, it is possible to estimate the degree of metal sensitivity to the original characteristics (yield stress, Poisson's ratio, grain diameter, relative constriction, Young's modulus, power-law hardening coefficient, etc.).
Discussion and Conclusion. Under stresses corresponding to the steel endurance limit, the critical crack opening rates of the tip and edges approach each other. Energetically, this moment approximately corresponds to the transition of the crack to an unstable state. The accumulation of one-sided plastic deformations causes the limiting state of plasticity of the region adjacent to the crack tip and its avalanche-like or sharply accelerated motion. This critical area is interrelated with the grain diameter of the material, the characteristic of critical plasticity and the critical opening at the crack tip at the fatigue limit. The proposed analytical dependences can be used to assess the residual life and the fatigue limit of welded structures, the influence of various factors on the fatigue limit of welded joints of ferrite-pearlitic steels used in mechanical engineering, shipbuilding, pipeline transport, etc.

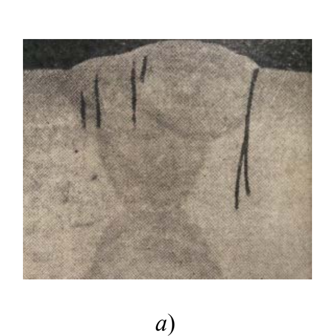
***Keywords**:* welded joint, ferritic-pearlitic steel, crack length, endurance limit, critical deformation, mathematical model, structural damage.

For citation: K. A. Molokov, V.V. Novikov, A. P. German. Analytical model for assessing fatigue limit of welded joints of ferritic-pearlitic steels. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 225−234. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-225-234

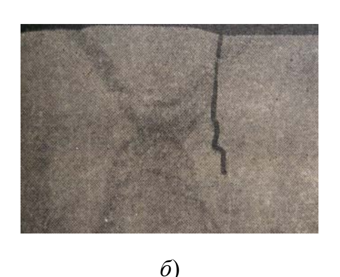
Введение. Микродефекты и зоны с концентрацией напряжений в сварных соединениях обусловливают появление усталостных макротрещин. Подобные повреждения потенциально опасны, особенно если ресурс усталостной прочности конструкции практически исчерпан. В этом случае размер трещины близок к критическому значению, и крайне важно определить ее длину. Статья посвящена разработке инженерной аналитической модели для оценки критической длины трещины и предела выносливости сварных соединений с образовавшимся зерном в структуре феррито-перлитных сталей после сварки.

Следует отметить, что сварное соединение, равнопрочное для статического нагружения, не гарантирует его надежности при циклических нагрузках. Это обусловлено локальными пластическими деформациями в местах концентрации напряжений в прерывистых связях конструкций, подверженных циклическим нагрузкам [1]. Можно предположить, что для пластичных материалов максимальные напряжения в этих зонах будут постоянными и равными пределу текучести, если пренебречь некоторым упрочнением материала в местах концентрации напряжений и принять, что области возмущенных напряжений относительно малы по сравнению с толщиной материала [2].

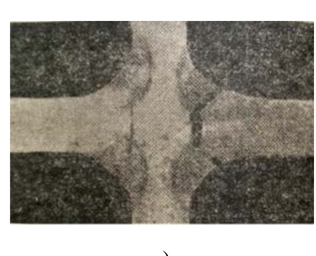
Материалы и методы. Предел выносливости конструкционных сталей приближенно соответствует значениям $\sigma_{-1} = 0{,}5 \ldots 0{,}7\sigma_{т}$, а разрушение при циклических напряжениях, как правило, происходит локально в виде трещин, берущих начало от концентраторов напряжений или дефектов сварного соединения (рис. 1).



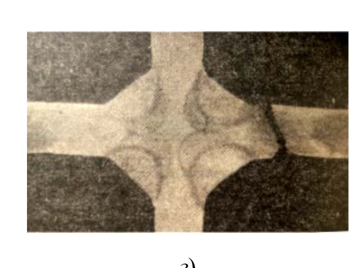
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Трещины в месте подреза и в шве: (*а*, *б*) разрушения крестовых соединений от трещины при неполном проплавлении; (*в*) и в зоне термического влияния (ЗТВ); при полном проплавлении (*г*) [2]

Концентрация напряжений, возникшая в результате недостаточного проплавления при формировании сварного соединения, также может играть решающую роль в образовании слабых зон. Этому способствуют значительная неоднородность механических характеристик, серьезные дефекты шва и околошовной зоны.

В угловых и тавровых соединениях (с разделкой кромок или без нее) в большинстве случаев трещина начинается от концентратора напряжений (рис. 1 *в*, *г*). Если шов выпуклый, разрушение может происходить по зоне сплавления или вблизи нее — по основному металлу в ЗТВ, структура которого претерпела изменения [3].

С течением времени микродефекты приводят к возникновению усталостных трещин [4, 5]. Такие трещины в сварных соединениях некоторых элементов распространяются медленно, поэтому могут быть не особо опасны. Об этом свидетельствует практика использования современных марок сталей для корпусов судов [6]. В то же время усталостные трещины потенциально опасны в двух случаях.

1. Если практически исчерпан ресурс, обеспечиваемый статической неопределимостью конструкции и другими факторами.

2. Если размер трещины соответствует Гриффитсовой критической длине в бесконечной пластине $L|_{\sigma_{-1}} = L_c$, определяемой зависимостью:

$$L = (K_{1c}/\sigma_{-1})^2/\pi, \quad (1)$$

где K_{1c} — критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации в вершине трещины; σ_{-1} — напряжение предела выносливости материала; L — половина длины сквозной тещины.

Коэффициент K_{1c} может быть рассчитан на базе стандартного набора механических характеристик и среднего диаметра зерна феррито-перлитной стали согласно [7] для плоской деформации и по [8] для плосконапряженного состояния. Однако, чтобы найти критическую длину трещины предела выносливости, необходимо знать величину σ_{-1}.

Механизм влияния среднего диаметра зерна стали в момент начала перехода трещины в лавинообразное продвижение, вероятно, отличается от механизма, контролирующего ее продвижение на стадии образования. Такие предположения, основанные на результатах исследований [7, 9–11], обусловливают более подробное рассмотрение процессов, контролирующих окончание стадии стабильного развития макротрещины при напряжениях, равных пределу выносливости. Его при критических размерах трещины не сложно определить по (1), если найти закономерности влияния структуры, пластических свойств и механических характеристик материала на размер критической трещины.

Цель данного исследования — разработка аналитических зависимостей, позволяющих установить взаимосвязь между критической длиной трещины при напряжениях σ_{-1}, механическими характеристиками феррито-перлитной стали и средним диаметром зерна в структуре металла. Задача — довести полученные зависимости до инженерных формул, позволяющих оценивать предел выносливости феррито-перлитных сталей.

Результаты изучения процесса трещинообразования при высоких номинальных напряжениях свидетельствуют о дискретном, скачкообразном их развитии [12]. Такой характер роста демонстрирует моделирование на окончательной стадии разрушения [7] при нагрузке, соответствующей пределу

выносливости. Это говорит о том, что после накопления односторонней пластической деформации пластическое деформирование сдерживается, если к вершине трещины примыкают большие объемы материала с фрагментированной структурой.

Результаты исследования. При высокой плотности дислокаций, создающих фрагментированную структуру, примем условия плоской деформации в вершине трещины. Дополнительные условия будут обеспечиваться за счет стеснения и набранной односторонней пластической деформации под циклическими нагрузками. Запишем постулаты для момента, когда $L = L_{кр}$, $\sigma = \sigma_{-1}$.

1. Односторонняя пластическая деформация достигает критической величины в вершине трещины.

2. Фрагментация (ячеистость) структуры феррито-перлитного материала предельна (находится на втором уровне).

3. Функция разности раскрытия берегов и вершины трещины имеет перегиб в точке, близкой к состоянию, когда $L = L_{кр}$, $\sigma = \sigma_{-1}$.

Из экспериментальных данных следует, что циклическое нагружение металлов вызывает значительное изменение структуры, субструктуры и влияет на все особо чувствительные характеристики. Например, увеличение числа циклов нагружения циклически упрочняющихся (или разупрочняющихся) металлов способствует повышению (или понижению) твердости (прежде всего на поверхности исследуемых образцов) [13, 14].

Результаты упругопластического анализа пластических зон в вершине трещины, определенные по модели Панасюка-Дагдейла [15], существенно отличаются от реальных для материалов с показателем упрочнения $m > 0{,}05$. Тем не менее будем считать, что при небольших номинальных напряжениях $\sigma_н = \sigma_{-1}$ раскрытие в вершине трещины δ и отношение δ/r_p могут быть определены достаточно точно для случая плоской деформации по формулам [16]:

$$\delta = 8\sigma_т \cdot L/pi/E \cdot \ln\sec[\pi\sigma_н/2/\sigma_т], \quad (1)$$

$$\delta/r_p = \frac{8e_т \ln\sec(\pi\sigma_н/2)}{\pi(\sec(\pi\sigma_н/2)-1)}, \quad (2)$$

где r_p — линейный размер пластической зоны на продолжении трещины от ее вершины (рис. 2); $e_т$ — деформация предела текучести.

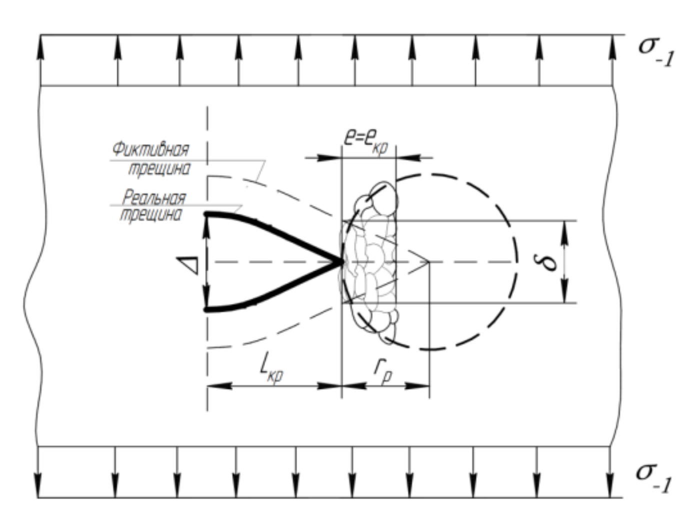


Рис. 1. Состояние металла в вершине критической трещины нормального отрыва под напряжениями предела выносливости

Оценим раскрытие берегов этой трещины при номинальных напряжениях ниже предела пропорциональности, допуская некоторую погрешность [16]:

$$\Delta = \frac{4\sigma_н L}{E}. \quad (3)$$

После дифференцирования разницы между δ и Δ находим, что напряжения, соответствующие моменту ускоренного сближения δ и Δ, будут соответствовать номинальным, определяемым по выражению:

$$\sigma_н = \sigma_т/2. \quad (4)$$

При значительных пластических деформациях структура материала претерпевает фрагментацию в вершине трещины, поэтому величина $e_{кр}$ связана со стадийностью и способностью к деформированию фрагментированной структуры. По А. М. Глезеру [17], граница между макропластической и мегапластической деформациями условна, находится на уровне относительной деформации, равной стопроцентной, или истинной. При этом значение критической деформации:

$$e_{\text{кр}} \approx 1. \tag{5}$$

А. Н. Балахнин[1] отмечает, что самоорганизация структуры с образованием ячеек (рис. 3) начинается уже при деформации феррита стали 09Г2С и при среднем значении степени холодной деформации ε 15–35%.

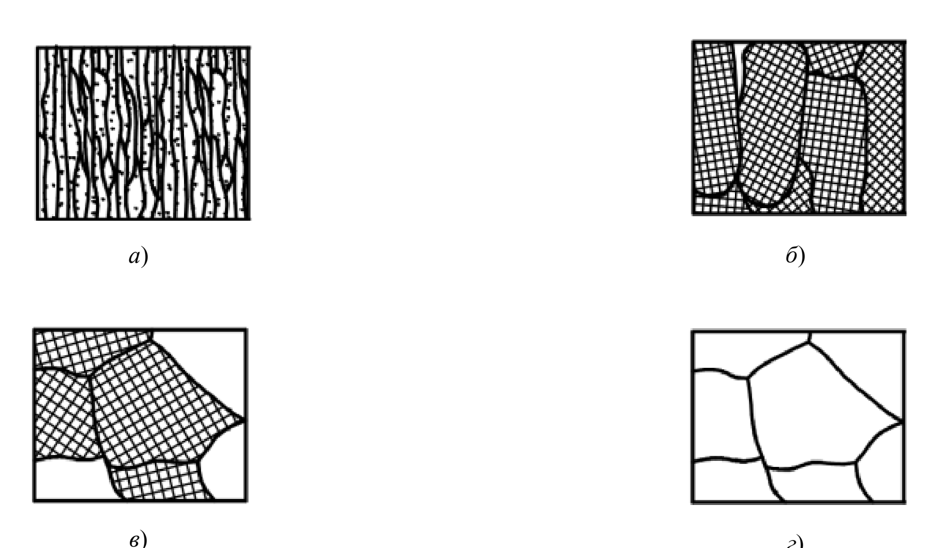


Рис. 3. Микроструктура при пластической деформации: ε = 80 % (*а*), ε = 40 % (*б*), ε = 1 % (*в*), ε = 0 % (*г*) [11]

При дальнейшем увеличении деформации происходит утонение стенок ячеек и уменьшение их размера. Фрагменты приобретают вытянутую форму, зерна вытягиваются в направлении пластического течения (рис. 3).

При критическом раскрытии трещины в области, примыкающей к вершине, на модели фиктивной трещины структура зерен должна стать вытянутой, перейти в предскольное состояние (рис. 3 *а*). Она, вероятно, будет сформирована за счет сдерживания подтока новых дислокаций и перехода их через границы зерен. Материал в данной области должен быть в состоянии предельной критической пластичности, а линейная характеристика его фрагментов — на втором фрагментарном уровне. Очевидно, что в примыкающей зоне пластичности у трещины также должно быть некоторое количество зерен в их предельном пластическом состоянии.

Итак, зона может быть образована за счет накопления части односторонней пластической деформации, охватывающей практически все стадии развития трещины. Однако наиболее существенный вклад в увеличение такой деформации вносится на окончательной стадии разрушения, когда область пластичности велика не только по отношению к длине трещины, но и к линейной характеристике структуры металла. В этой зоне зерна имеют вытянутую форму в виде продолговатой рисинки с размером поперечного сечения $d_{\text{к}}$.

Отнесем средний диаметр зерна недеформированного материала d_z к $d_{\text{к}}$. Тогда для второго фрагментарного уровня:

$$d_z/d_{\text{к}} \cong 1/0{,}618/0{,}618 = 2{,}618, \tag{6}$$

где $d_{\text{к}}$ — диаметр фрагмента.

Не трудно заключить, что для этого состояния пластическая деформация может быть определена по зависимости максимального равномерного удлинения [3, 14]:

$$e_{\text{кр}} = 2\,ln(d_z/d_{\text{к}}) \cong 2. \tag{7}$$

Для этого же состояния критическая пластическая деформация на испытываемом образце в шейке при разрыве выражается известной зависимостью:

$$e_{\text{кр}} = k_{\text{н}} \cdot ln\left(\frac{1}{1-\varphi_{\text{к}}}\right), \tag{8}$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент нормирования, введенный авторами для перехода от структуры в критическом пластическом состоянии к значению критической пластической деформации образца при разрыве.

Найдем этот коэффициент через относительное (критическое) сужение образца при разрыве, приравняв (9) к (8). Тогда с учетом (6) критическая пластическая деформация определяется по выражению:

$$e_{\text{кр}} = 2 = ln\frac{1}{1-\varphi_{\text{к}}} + ln\frac{1}{1-\varphi_{\text{к}}} = 2\,ln\frac{1}{1-\varphi_{\text{к}}}\,. \tag{9}$$

Для критического раскрытия в вершине трещины структурно-деформационный критерий можно выразить:

[1] Балахнин А. Н. Формирование структуры и свойств закаленных конструкционных низкоуглеродистых сталей при холодной радиальной ковке и последующем термическом воздействии : дис. … канд. тех. наук. Пермь, 2015. 158 с.

$$\delta_{кр} = d_з e_{кр} = 2d_z \, ln\left(\frac{1}{1-\varphi_к}\right). \quad (10)$$

В результате влияния критического поперечного сужения $\varphi_к$ на коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации K_{1c} для высокопрочных сталей отмечены [18]:
— значительный разброс значений K_{1c} и $\varphi_к$;
— удовлетворительная корреляция между ними.

При этом заключается, что взаимосвязь K_{1c} и $\varphi_к$ можно применять только как качественную. С такими выводами можно согласиться, но только если отбросить взаимосвязь с некоторыми другими структурными характеристиками, например средним диаметром зерна стали и пр.

Для нахождения искомой зависимости подставим (5) в (2). Полученное выражение приравняем к (11) и запишем его относительно L. В результате выкладок получим критическую длину макротрещины для номинальных напряжений, равных пределу выносливости при наиболее опасной асимметрии цикла:

$$L_{кр}\Big|_{\sigma_н=\sigma_{-1}} = 0{,}3607\,\frac{\pi\cdot E}{\sigma_т}\,2d_z \ln\left(\frac{1}{1-\varphi_к}\right). \quad (11)$$

Из этого следует, что длина критической трещины прямо пропорциональна величине критической логарифмической пластической деформации $e_{кр}$ стали и обратно пропорциональна деформации текучести $\sigma_т/E$. Преобразовав численную постоянную, (12) можно записать в виде:

$$L_{кр}\Big|_{\sigma_н=\sigma_{-1}} = 0{,}7214\,\frac{\pi\cdot d_z\cdot e_{кр}}{\varepsilon_т}. \quad (12)$$

Используя эмпирическую зависимость сопротивления микросколу зерна $R_{Мс} = \sigma_в/(1-\varphi_к^2)$, справедливую для группы феррито-перлитных низкоуглеродистых сталей, находим средний диметр зерна:

$$d_z = [5{,}7(1-\varphi_к^2)/\sigma_в]^2. \quad (13)$$

Здесь $\sigma_в$ — предел прочности стали. Подставляя d_z в (13), можно получить искомую простую формулу для оценки $L_{кр}$, в которую входят только основные характеристики материала.

Для вычисления предела выносливости симметричного цикла достаточно приравнять (12) к (1). Чтобы найти K_{1c}, воспользуемся выводом, полученным в [7]. Окончательная формула для расчета K_{1c} при условиях плоской деформации в вершине трещины строго математически имеет вид:

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{\pi\, 0{,}618\, d_z}{[{\sigma_т}^{1/m-1}\cdot(1-2\mu)^2\,]/2}\left(\frac{R_{Mce}\cdot D}{q}\right)^{1/m+1}}\,. \quad (14)$$

Здесь R_{Mce} — сопротивление микросколу деформированного металла, которое для класса феррито-перлитных сталей составляет $R_{Mce} = 1{,}618R_{Mc}$; R_{Mc} — сопротивление микросколу ферритного зерна; m — коэффициент (показатель) степенного упрочнения материала; q — коэффициент перенапряжения, равный для данного случая $1-2D/\sqrt{3}$; μ — коэффициент Пуассона. D — коэффициент, который учитывает повышение первого главного напряжения в случае сложного напряженного состояния. Для плоской деформации он принимает значение $(1+m)(1-2\mu)/2$.

Сопротивление микроскола зерна вычисляется по классической зависимости $R_{Mc} = 5{,}7/\sqrt{d_z}$ для скола ферритного или феррито-перлитного зерна. Выполнив подстановку (15) со всеми составляющими из (12) в (1), получаем окончательное значение предела выносливости в зависимости от стандартного набора механических характеристик материала и среднего диаметра зерна:

$$\sigma_{-1} = \sqrt{\frac{1{,}091\left(\frac{4{,}611\cdot(1-2\mu)(m+1)}{\sqrt{d_z}}\right)^{1/m+1}\cdot{\sigma_т}^{2-1/m}}{E(2\mu-1)^2\cdot e_{кр}\left(\frac{\sqrt{3}\cdot(2\mu-1)(m+1)}{3}+1\right)^{1/m+1}}} \quad (15)$$

Если значение среднего диаметра зерна d_z неизвестно, его можно вычислить по (14).

Результаты численного тестирования предела выносливости показывают, что зависимость (16) «чувствительна» к некоторым характеристикам материала. Например, варьирование значения коэффициента Пуассона в сотых долях может изменить результат в $\sqrt{2}$ раз. Вероятно, такая погрешность расчетов связана с особенностью используемых моделей и принятыми допущениями при выводе (16).

Проверим адекватность предложенной аналитической модели на примере группы феррито-перлитных сталей (таблица 1).

Таблица 1

Основные экспериментальные и расчетные характеристики сталей

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	μ	m	$\varphi_к$	$d_з$, мкм	K_{1c}, МПа	σ_{-1}, МПа
Сталь 10	190	320	0,3	0,17	0,73	66	103,6	135,4[1]
Ст3сп	270	450	0,3	0,16	0,71	37	101	192[1]
22К	310	540	0,3	0,16	0,69	30	97	220[1]
Сталь 50	350	680	0,3	0,16	0,62	25	78	247[1]
37ХН3А	743	1014	0,26	0,12	0,6	14[3]	73	480[1]
15Г	280	490	0,29	0,156[1]	0,65	45[4]	–	230
09Г2	300	440	0,29	0,16	0,69	33	–	235
30ХГСА	1360	1750	0,26	0,13[2]	0,44	7[4]	–	490
16Г2АФ	417	600	0,29	0,16	0,5	22	–	255
10ХСНД	390	540	0,29	0,132[2]	0,71	27[4]	–	284

[1] Значения получены расчетом [7].

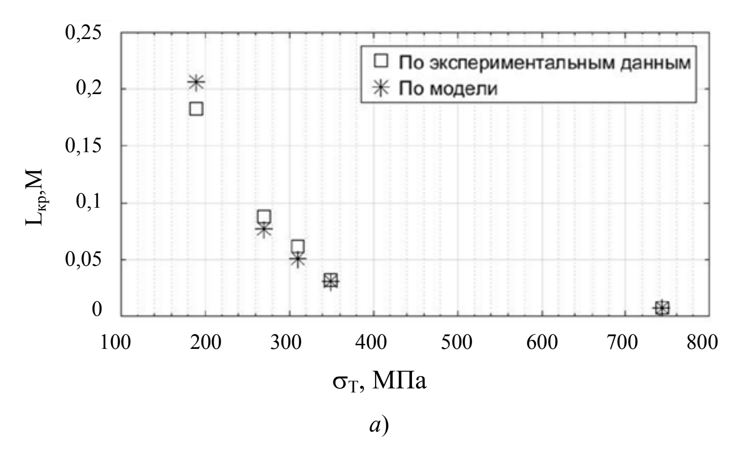
[2] Расчет по зависимости $m = \left\{0,75 \cdot lg\left[\sigma_в(1 + 1,4\varphi_к)/\sigma_{0,2}\right]\right\}/lg\left[10^5 \cdot ln\left(\frac{1}{1-\varphi_к}\right)/\left(200 + 0,5\sigma_{0,2}\right)\right]$ [2].

[3] Вычислено по данным сопротивления микроскола недеформированного материала.

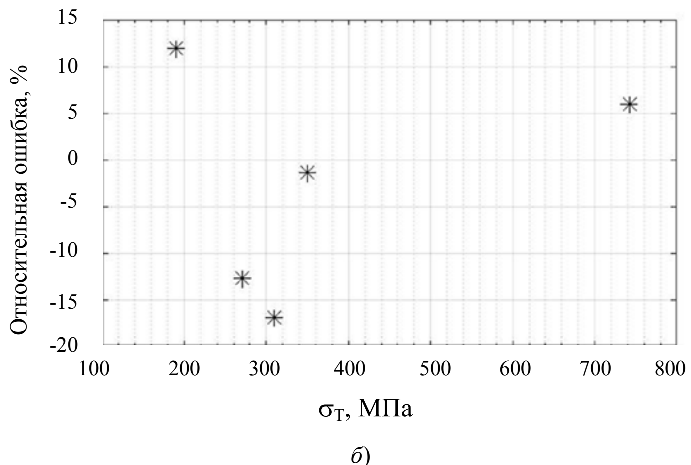
[4] Расчет по зависимости (14).

Для сопоставления результатов, полученных по (12), находим критические длины трещин по экспериментальным данным и с учетом формулы (1). Пределы выносливости рассчитываем при условии плоской деформации по методу [7], который учитывает средний диаметр зерна, коэффициент упрочнения m и другие механические характеристики, существенно влияющие на предел выносливости.

На рис. 4*а* представлены значения критических длин сквозных трещин на пределе выносливости для сталей с разными пределами текучести. Расчетные величины по (12) сопоставлены с экспериментальными данными. Сравнение показало достаточно хорошее согласование для феррито-перлитных сталей разной прочности, несмотря на принятые многочисленные допущения (рис. 4 *б*).



а)



б)

Рис. 4. Значения критических длин трещин сталей в зависимости от предела текучести (*а*) и относительная погрешность модели (*б*)

На рис. 5 показаны результаты сравнения предела выносливости симметричного цикла по (16) для группы сталей (таблица 1) с экспериментальными и известными расчетными значениями.

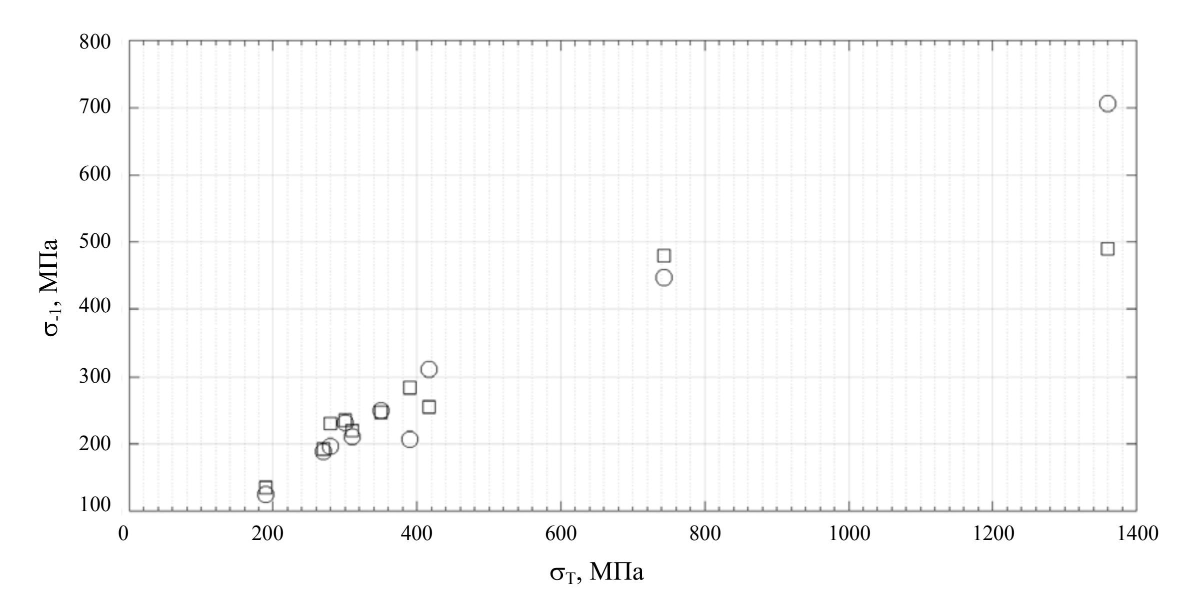


Рис. 5. Сравнение пределов выносливости симметричного цикла и пределов текучести: ○ — расчет по модели (16); □ — известные данные (таблица 1)

По результатам сравнительного анализа можно сделать выводы.

1. Чем прочнее сталь, тем больше сказывается «чувствительность» (16) к исходным данным и растет погрешность расчетов.

2. Для феррито-перлитных сталей с $\sigma_т < 400$ МПа результаты расчета пределов выносливости удовлетворительно согласовываются с исходными данными таблицы 1.

Зависимость (16) обладает высокой «чувствительностью» к некоторым исходным параметрам, поэтому на данном этапе исследования невозможно более точно оценить результаты.

При приближении длины трещины к критическому значению $L_{кр}$ она начинает расти скачкообразно. Поэтому детерминистическая модель не может точно определить, через сколько циклов закончится такое развитие трещины, и она распространится со скоростью звука. Средний диаметр зерна материала может значительно различаться в зонах сварных конструкций — например, в ЗТВ и материале, на который не повлияла сварка. Следует учесть, что стадия развития макротрещины на воздухе для элементов крупногабаритных деталей без концентраторов напряжений занимает по времени почти 20%. В связи с этим при определении $L_{кр}$ относительную погрешность до ~15% можно считать положительным результатом. В рамки этой погрешности попадает период так называемого «циклического долома» [11], где для низких циклических усталостных напряжений ~1/10 часть остаточного ресурса соответствует возрастанию длины трещины примерно в два раза.

Таким образом, предложенные на основе критериев структурно-деформационного анализа аналитические зависимости могут быть использованы в расчетах предела выносливости судовых и других крупногабаритных конструкций.

Обсуждение и заключение. Для безопасной эксплуатации морских судов необходима актуальная и адекватная информация о состоянии конструкций корпуса, в том числе о металлургических дефектах и конструктивных концентраторах напряжений. Важны оценка остаточного ресурса и, соответственно, определение критических размеров усталостных трещин. В вершине критической развивающейся макротрещины при напряжениях, соответствующих пределу выносливости, накапливается односторонняя пластическая деформация, которая снижает пластичность сильно фрагментированной зоны. При этом количество циклов остаточного ресурса остается незначительным и сильно зависит от предела текучести, дефектов, диаметра зерна стали конструкции, в которой развивается трещина.

В результате исследования установлено, что при напряжениях, соответствующих пределу выносливости стали, сближаются скорости раскрытия критической трещины вершины и берегов. Этот момент энергетически примерно соответствует переходу трещины в нестабильное состояние. Накопление односторонних пластических деформаций приводит к предельному состоянию пластичности области, примыкающей к вершине трещины и лавинообразному или резко ускоренному ее движению. Эта критическая область взаимосвязана с диаметром зерна материала, характеристикой критической пластичности и

критическим раскрытием в вершине трещины на пределе выносливости.

Полученные аналитические зависимости позволяют с учетом среднего диаметра зерна феррито-перлитной стали и критического сужения рассчитывать предел выносливости наиболее опасного цикла нагружения по классической Гриффитсовой взаимосвязи между длиной трещины, напряжениями и коэффициентом интенсивности напряжений.

Предложенные математическая модель и подход на основе критериев структурно-деформационного анализа могут быть использованы в инженерных расчетах машиностроительных, судовых конструкций и их соединений для оценки эксплуатационного ресурса.

Библиографический список

1. Казанов, Г. Т. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций / Г. Т. Казанов, В. В. Новиков, Г. П. Турмов. — Владивосток : Изд-во ДВФУ, 2014. — 178 с.

2. Молоков, К. А. Основы расчетного проектирования сварных конструкций. Том 1. Напряженное состояние и основы конструирования / К. А. Молоков, В. В. Новиков, Г. П. Турмов. — Владивосток : Изд-во ДВФУ, 2019. — 204 с.

3. Ямалеев, К. М. Структурные аспекты разрушения металла нефтепроводов / К. М. Ямалеев, Л. Р. Гумерова. — Уфа : Гилем, 2011. — 144 с.

4. Jordan, C. In-Service Performance of Structural Details / C. Jordan, C. Cochran. — Washington: Ship Structure Committee, 1978. — 188 p.

5. Akita, Y. Statistical Trend of Ship Hall Failure / Y. Akita // PRADS, 83: the Proceedings of the 2nd International Symposium on Practical Design in Shipbuilding in Tokyo and Seoul, October 17–22. — Tokyo: Society of Naval Architects of Japan, 1983. — P. 619–624.

6. Повреждения и расчетный анализ прочности корабельных конструкций / В. В. Новиков, Г. П. Турмов, О. Э Суров [и др.]. — Владивосток : Изд-во ДВФУ, 2020. — 266 с.

7. Матохин, Г. В. Основы расчетных методов линейной механики разрушения / Г. В. Матохин, К. П. Горбачев. — Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2008. — 304 с.

8. Молоков, К. А. Оценка выносливости сварных соединений с учетом общего пластического деформирования материала при плоском напряженном состоянии / К. А. Молоков // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2019. — № 1 (38). — С. 19–26.

9. Файвисович, А. В. Кинетика геометрии макротрещины / А. В. Файвисович, И. Г. Береза // Эксплуатация морского транспорта. — 2019. — № 1 (90). — С. 77–83.

10. Федотов, С. Н. Квазихрупкое разрушение как разрушение иерархической структуры / С. Н. Федотов // Физическая мезомеханика. — 2015. — Т. 18, № 6. — С. 24–31.

11. Терентьев, В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева. — Москва : Наука, 2015. — 479 с.

12. Иванова, В. С. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов / В. С. Иванова. — Уфа : Изд-во УГНТУ, 1998. — 363 с.

13. Иванова, В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. — Москва : Металлургия, 1975. — 454 с.

14. Кроха, В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации / В. А. Кроха. — Москва : Машиностроение, 1980. — 157 с.

15. Поля деформаций при малоцикловом нагружении / С. С. Сергисен, Р. М. Шнейдорович, Н. А. Махутов [и др.]. — Москва : Наука, 1979. — 277 с.

16. Куркин, С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением / С. А. Куркин. — Москва : Машиностроение, 1976. — 184 с.

17. Основы пластической деформации наноструктурных материалов / Под ред. А. М. Глезера. — Москва : Физматлит, 2016. — 304 с.

18. Смирнов, А. Н. Разрушение и диагностика металлов / А. Н. Смирнов, В. В. Муравьев, Н. В. Абабков. — Москва ; Кемерово : Инновационное машиностроение, 2016. — 479 с.

Сдана в редакцию 20.04.2020
Запланирована в номер 01.07.2020

Об авторах:

Молоков Константин Александрович, доцент кафедры «Сварочное производство» ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), кандидат технических наук, ResearcherID AAH-6348-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9764-9329, ScopusID: 57197836777, Spektrum011277@gmail.com.

Новиков Валерий Васильевич, доцент кафедры «Кораблестроение и океанотехника» ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5892-815X, ScopusID: 5641710410, leka1551@rambler.ru.

Герман Андрей Петрович, доцент кафедры «Кораблестроение и океанотехника» ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), ResearcherID D-1725-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9530-5258, ScopusID: 56417290300, gerand1@yandex.ru.

Заявленный вклад соавторов

К. А. Молоков — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. В. В. Новиков — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка выводов, корректировка текста. А. П. Герман — работа с источниками, корректировка текста, оформление, подготовка сопровождающих документов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.01 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242

Формирование качества поверхностного слоя при абразивной обработке полимеркомпозитных материалов



М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. В. Верченко, В. М. Троицкий
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Представлены результаты исследований процесса абразивной обработки деталей из полимеркомпозитных материалов. Описаны особенности обработки полимеркомпозитов, технология получения заготовки гидроабразивной резкой. Исследованы этапы подготовки детали из полимеркомпозитного материала к операции «склеивание».
Материалы и методы. Учтены зависимости для определения шероховатости поверхности при гидроабразивной резке полимеркомпозитного материала. Выполнены исследования по достижению необходимой шероховатости поверхности при склеивании заготовок. Приведена зависимость, описывающая шероховатость, которой необходимо достичь для обеспечения надежного клеевого соединения.
Результаты исследования. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса гидроабразивной резки. Описана методика их проведения, применяемый инструмент и оснастка. Сопоставлены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Установлена их высокая сходимость. Показаны итоги экспериментальных исследований по подготовке деталей из полимеркомпозитных материалов к склеиванию. Подобраны абразивный инструмент и режимы обработки.
Обсуждения и заключения. Предложена методика проектирования технологического процесса абразивной обработки заготовок из полимеркомпозитных материалов.

Ключевые слова: обработка полимеркомпозитных материалов, гидроабразивная резка, обработка лепестковыми кругами, шероховатость поверхности.

Для цитирования: Формирование качества поверхностного слоя при абразивной обработке полимеркомпозитных материалов / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. В. Верченко, В. М. Троицкий // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 235−242. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242



Formation of surface layer quality under abrasive treatment of polymer-composite materials

M. A. Tamarkin, Eh. Eh. Tishchenko, A. V. Verchenko, V. M. Troitskii
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The study results of the abrasive processing of parts made of polymer-composite materials are presented. The features of processing polymer composites and the technology of preforming through waterjet cutting are described. The stages of preparation of a part made of polymer-composite material for the “glueing” operation are investigated.
Materials and Methods. Dependences for determining the surface roughness under waterjet cutting of polymer-composite material are considered. Research is carried out to achieve the required surface roughness under adhesive bonding of workpieces. The dependence is given that describes the roughness that is required for a reliable adhesive bond.
Results. The theoretical and experimental studies of the waterjet cutting process are resulted. Their implementation technique, the tool and equipment used are described. The results of theoretical and experimental studies are compared. Their high convergence is established. The results of experimental studies on the preparation of parts made of polymer-composite materials for glueing are shown. The abrasive tools and processing modes are selected.

Discussions and Conclusions. The process design procedure of abrasive treatment of workpieces from polymer-composite materials is proposed.

Keywords: treatment of polymer composites, waterjet cutting, treatment by petal wheels, surface roughness.

For citation: M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, A.V. Verchenko, et al. Formation of surface layer quality under abrasive treatment of polymer-composite materials. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 235−242. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-235-242

Введение. Повышение производительности труда на современном машиностроительном производстве возможно за счет применения новых технологий и материалов. Для изготовления деталей машин все шире используют полимеркомпозитные материалы (ПКМ). Это композиция двух и более материалов — основы и связующего. Изделия из полимеркомпозитов по сравнению с металлическими имеют лучшие физико-механические свойства и при этом, как правило, гораздо меньше весят. Анизотропная структура полимеркомпозитного материала позволяет распределять полезную нагрузку по всей конструкции изделия, что повышает его эксплуатационные свойства. ПКМ формируется определенным образом. Слои основы укладываются в направлениях, взаимно противоположных друг другу. А связующее выполняет роль наполнителя, т. е. обеспечивает неподвижность и заполнение пространства между слоями основы. На поверхности полимеркомпозита формируется особый слой, образованный отвердевшим связующим. Этот слой может не совпадать с идеальной формой поверхности. Его адгезионные свойства обеспечивают:

— вещества, которые находятся на поверхности детали и содержат отвердитель,

— продукты химической реакции, происходящей во время отверждения.

Антиадгезионный слой полимеркомпозита подлежит удалению механической обработкой. При этом обеспечивается оптимальная шероховатость поверхности обработанной детали. Механическая обработка ПКМ имеет ряд особенностей:

— образуются расслоения,

— волокна вблизи места обработки разлохмачиваются,

— выделяется большое количество тепла при резании,

— образуются прижоги,

— материал разрушается.

При этом не всегда можно применять смазывающие охлаждающие жидкости, так как их воздействие ведет к расслаиванию, набуханию, и ПКМ теряет необходимые физико-механические свойства. Это связано с тем, что полимеркомпозиты обильно поглощают влагу. Применение жидкости при обработке ПКМ требует дальнейшего изучения.

На большинстве предприятий, где производятся детали из полимеркомпозитов, технологический процесс состоит из раскроя листа и дальнейшей механической обработки заготовки. Часто полимеромпозитные детали склеивают, что требует тщательной подготовки поверхностного слоя. В рамках данной работы исследовано формирование качества поверхности при гидроабразивной резке ПКМ, а также при подготовке поверхности к дальнейшему склеиванию.

Материалы и методы. В современном машиностроении получает все большее распространение раскрой материалов методом гидроабразивной резки. Его преимущества: большое разнообразие обрабатываемых материалов, высокая производительность, хорошее качество поверхности реза и возможность получать фасонные поверхности. При использовании этого метода не возникают значительные внутренние напряжения в связи с низкотемпературным характером процесса.

Кроме того, для гидроабразивной резки характерен малый припуск и высокая точность реза. Этим она отличается от лезвийной обработки и обработки связанным абразивом. Процесс разрезания материала гидроабразивной струей достаточно сложен, мало изучен, на его результат влияют многие технологические факторы: скорость истечения струи из сопла, скорость передвижения сопла вдоль детали, характеристики абразивного порошка, расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности, а также физико-механические свойства обрабатываемых полимеркомпозиционных материалов. Возникают некоторые сложности при проектировании технологии резки. Они связаны прежде всего с выбором оптимальных режимов резания: необходимо обеспечить заданное качество поверхности детали при наименьших затратах на обработку. Применение гидроабразивной резки для обработки ПКМ требует также исследования влияния воды на состояние поверхности реза. Предварительные исследования позволили установить силу энергии сверхзвуковой струи воды с абразивом. Она настолько велика, что при ее взаимодействии с обрабатываемой поверхностью разрушение по интенсивности сравнимо с повреждением от твердого абразивного инструмента.

При резке вода не отклоняется от траекторий движения, воздействие на материал заготовки минимальное, т. е. вода не поглощается [1–4].

Как известно, при глубоком резании материалов (в том числе полимеркомпозитных) в зоне контакта абразивной струи и разрезаемого материала возникают две четко отслеживаемые зоны:

— с низкой шероховатостью поверхности (зона гладкого реза),

— с более высокой шероховатостью (зона волнистого реза) [1, 2].

Их появление обусловлено тем, что при контакте струи с нижней частью реза растет угол атаки внедренных частиц. Значительное их число не участвует в полезном соударении, отражается от материала. При этом новые взаимодействующие частицы встречают препятствие, отражаются и вызывают блокировку частиц, поступающих в зону обработки. В результате появляется зона волнистого реза с высокой шероховатостью поверхности. В верхней части реза соударению частиц ничто не препятствует, поэтому образуется поверхность более гладкая, с меньшей шероховатостью. В современных условиях при проектировании технологических процессов гидроабразивной резки сложно определить не только величины шероховатости поверхности различных зон реза, но и размеры самих зон гладкого и волнистого реза. Прогноз получения необходимой шероховатости на стадии проектирования технологии позволит определять целесообразность чистовой обработки и требуемые в этом случае величины припусков.

Теоретические исследования формирования профиля шероховатости различных зон реза ПКМ выявили закономерности, описывающие процесс взаимодействия абразивной частицы с поверхностью обрабатываемой детали. Установлено, что шероховатость поверхности реза зависит от технологических параметров обработки. Разрезаемый слой материала условно разделен на две зоны резов: волнистого и гладкого. Описан механизм формирования этих зон. Определен диапазон глубин внедрения частиц [1–2]:

$$h_{\max} = DK_L \sin\alpha \sqrt{\frac{2P_{дин}\rho_ч}{3c\rho_{см}k_s\sigma_s}}, \qquad (1)$$

где $\rho_ч$ — плотность материала частиц; k_s — коэффициент, который учитывает влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; K — объемная концентрация частиц в рабочей жидкости; $P_{дин}$ — динамическое давление смеси; $\rho_{см}$ — плотность рабочей смеси жидкости и частиц; σ_s — предел текучести материала детали; D — диаметр частицы; K_L — коэффициент потерь энергии на преодоление расстояния от сопла до поверхности детали; c — коэффициент несущей способности контактной поверхности; α — угол соударения абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью.

Поток абразивных частиц опишем как поток событий, соответствующий распределению Пуассона: частицы среды выполняют микрорезание в фиксированном интервале времени, который не зависит ни от начала его отсчета, ни от возможных реализаций предыдущих или последующих аналогичных актов. Параметр λ в законе Пуассона представляет собой интенсивность потока событий. Примем для гидроабразивной резки, что λ — это число возможных взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки абразивных частиц. Тогда через каждую сторону квадрата упаковки $2R$ пройдет $\sqrt{\lambda}$ частиц, а через единичную длину — $\frac{L_{ед}}{2R}$ частиц. С учетом этого предложена формула, которая позволяет определить среднее арифметическое отклонения профиля установившейся шероховатости поверхности при гидроабразивной резке ПКМ [1, 2]:

$$Ra = 13{,}01K_\alpha^{Ra} \cdot R\sqrt{K_L \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{\frac{P_{дин} \cdot \rho_ч}{\lambda \cdot c \cdot \rho_{см} \cdot k_S \cdot \sigma_S}}}, \qquad (2)$$

где K_α^{Ra} — коэффициент, учитывающий угол соударения абразивных частиц с поверхностью детали; R — средний радиус частиц.

Число полезных взаимодействий λ функционально зависит от величины подачи, давления абразивной струи, глубины измерения шероховатости $\lambda = f(S, Q, h)$. Теоретическое описание величины λ затруднено. Поэтому λ определена на основании экспериментальных исследований, которые позволили предложить комплекс регрессионных зависимостей.

Эксперименты проходили на базе ростовского вертолетного производственного комплекса ПАО «Роствертол». Использовалась 5-координатная установка для гидроабразивной резки *Flow*. В качестве абразивной среды применили гранатовый песок. Образцы изготавливали из стеклопластика ВПС-7, армированного титановой фольгой (маркировка ОТ4-0-0,1×220). Этот стеклопластик на «Роствертоле» используют для натурных деталей вертолета Ми-28.

Шероховатость поверхности измерялась с помощью цифрового профилометра *Surtronic* 25 фирмы *Taylor Hobson*. Воздействие воды на резание ПКМ исследовалось на дифференциально сканирующем

калориметре DSC 200 F3 *Maia* фирмы *NETZSCH*. Результаты обрабатывались методом математической статистики в программе *MathCad*.

Результаты исследования. Шероховатость поверхности реза повышается с увеличением подачи сопла. Одновременно возрастает относительная высота зоны волнистого реза. Определены интервалы значений шероховатости поверхности и режимы обработки, необходимые для гидроабразивной резки ПКМ с заданными свойствами. При исследовании влияния подачи сопла скорость его движения изменялась в диапазоне от 5 до 480 мм/мин. Для материала характерны слоистая структура и анизотропия. В этой связи шероховатость поверхности реза измерялась в двух направлениях: перпендикулярно подаче и вдоль нее.

Анализ результатов экспериментальных исследований процесса гидроабразивной резки позволяет получить модели формирования поверхности реза:

— однофакторную, описывающую изменение шероховатости поперек сечения реза;

— двухфакторную — для расчета изменения шероховатости вдоль сечения реза и варьирования глубины измерения шероховатости (4) на основании регрессионного анализа:

$$Ra = 3,538 \cdot 10^{-6} + 4,721 \cdot 10^{-6} \cdot S, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Ra = {} & 2,706 \cdot 10^{-13} \cdot S \cdot h - 3,157 \cdot 10^{-10} \cdot h + 1,886 \cdot 10^{-8} \cdot h^2 - \\ & - 3,062 \cdot 10^{-7} \cdot h - 1,301 \cdot 10^{-10} \cdot S \cdot h + 1,469 \cdot 10^{-12} \cdot S^2 \cdot h + \\ & + 4,288 \cdot 10^{-6} + 1,324 \cdot 10^{-8} \cdot S - 5,142 \cdot 10^{-11} \cdot S^2 + 7,308 \cdot 10^{-14} \cdot S^3. \end{aligned} \quad (4)$$

Изучено влияние воды на термофизические свойства полимеркомпозита при гидроабразивной резке. Исследование проводилось методом дифференциально сканирующей калориметрии. В результате установлена возможность использования данного метода обработки для резки деталей из ПКМ.

Шероховатость поверхности реза определялась по теоретической модели (2) и сравнивалась с результатами, полученными экспериментально. Установлено, что расхождение не превышает 15 %. Это свидетельствует о том, что полученный комплекс теоретических моделей может быть использован при технологическом проектировании обработки деталей из ПКМ.

На многих машиностроительных предприятиях для подготовки поверхности к склеиванию применяют ручную обработку шлифовальной шкуркой (ГОСТ 13344−79, ГОСТ 5009−82 и ГОСТ 10054−82). Как правило, образец шлифуется до снятия глянца, что позволяет удалить с детали тонкий слой связующего и не повредить волокна. При этом трудоемкость ручной операции очень высокая, и затраты на нее велики. Шлифовальная шкурка быстро изнашивается, и ее приходится менять. Кроме того, качество зашкуривания напрямую зависит от квалификации сотрудника, его умения создать определенную силу прижима и удалить поверхностный слой без разрушения волокон композита [4–8].

Необходимо снизить трудоемкость рассматриваемой операции, исключить ручной труд, сохранив качество обработки. В этой связи предложены два подхода к решению проблемы. Первый базируется на всестороннем исследовании процессов обеспечения шероховатости, заданной для деталей из ПКМ. Предполагается, что полученная шероховатость обеспечит прочность склеивания и при этом не придется ограничиваться минимально возможной шероховатостью. Можно подобрать инструмент для механизации обработки деталей из ПКМ. Такие исследования проводились на «Роствертоле» с натурными деталями из полимеркомпозитных материалов. Рассматривалась обработка шлифовальными эластичными инструментами, которая позволяет механизировать процесс. Зерна перемещаются в направлении нормальной составляющей усилия резания, снижая напряженность теплового потока и обеспечивая повышение стойкости инструмента [7]. Особенность этого процесса — отсутствие микротрещин, характерных для обработки жестким шлифовальным инструментом [8]. Кроме того, отсутствие необходимой жесткости характерно для многих деталей из ПКМ: обшивок, оболочек, колпаков и т. п. Для их обработки гораздо целесообразнее применять эластичный шлифовальный инструмент. За счет своих упругих свойств такой инструмент (в отличие от инструмента на жесткой основе) гасит вибрации и колебания, а также амортизирует при обработке [4–8]. Гигроскопичность полимерных композиционных материалов затрудняет или не допускает использование охлаждающей жидкости при обработке. Для таких случаев хорошо подходит гибкий абразивный инструмент. Он обеспечивает высококачественное шлифование без охлаждения и без смачивания поверхности обрабатываемой детали.

Теоретически исследовано формирование качества поверхности детали из ПКМ, предназначенной для дальнейшего склеивания.

При расчете параметров шероховатости поверхности использована методика, разработанная профессором А. В. Королевым [9]. Ее применяют для описания формирования профиля шероховатости при обработке жестко связанным абразивом:

$$Ra = 0,9\sqrt{\frac{t_c \cdot v_S \cdot l_ф^3 \cdot L_{ед}}{60 \cdot v_K \cdot L_K}}\,, \quad (5)$$

где t_c — толщина слоя материала, снимаемого за один проход; v_s — скорость подачи; $l_ф$ — фактическое расстояние между контактными зернами; $L_{ед}$ — ширина обрабатываемого участка; $v_к$ — скорость круга; $L_к$ — суммарная протяженность лепестков.

Для проверки адекватности полученной зависимости провели комплекс экспериментов по подготовке полимеркомпозитных деталей к дальнейшему склеиванию. Образцы из стеклопластика ВПС-7, имеющие значительную площадь (80 × 200 мм), обрабатывались гибкими лепестковыми абразивными кругами фирмы *Klingspor* (модель ММ 630 с рассеченными ламелями, рис. 1).

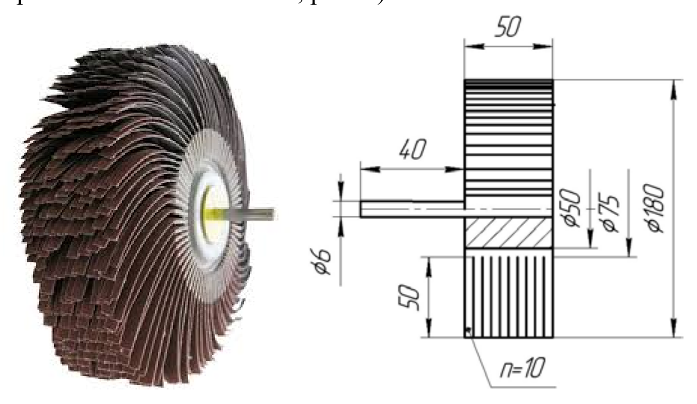


Рис. 1. Схема абразивного лепесткового круга фирмы *Klingspor* (модель ММ 630): диаметр — 180 мм, ширина — 50 мм, абразивный материал — электрокорунд, связующий материал — смола синтетическая

Лепестки шлифовальной шкурки закреплены на оправке диаметром 6 мм и рассечены в радиальном направлении на десять равных сегментов, которые, в свою очередь, завернуты в одном направлении. Длина такого сегмента 50 мм. Инструмент имеет высокую эластичность и может изготавливаться из абразивных материалов различной зернистости.

Стабильность режимов обработки достигается постоянством центробежных и упругих сил, создаваемых лепестками шлифовальной шкурки. На качество поверхностного слоя обработанных деталей существенно влияет скорость подачи и удельное давление лепестков. Важное значение имеет также динамический радиус круга $r_Д$ — расстояние от его оси до поверхности соприкосновения лепестка с обрабатываемой деталью [7, 9].

Выбранный таким образом шлифовальный круг закреплялся в шпинделе вертикально-фрезерного станка. Скорость вращения круга составляла 450–1400 об/мин, подача — 100–800 мм/мин. Динамический радиус выбирали из размеров: 55 мм, 60 мм, 65 мм, что создает различную площадь контакта лепестков с поверхностью обрабатываемой детали. Образцы закреплялись на станке в специальном устройстве.

Эксперименты доказали возможность получения равномерной матовой поверхности, лишенной глянца, при использовании гибких лепестковых кругов. После обработки целостность волокон не была нарушена. Шероховатость поверхности образцов замерялась на профилометре *Tailor Hobson*. Для вышеописанных режимов получено среднее арифметическое значение шероховатости Ra = 1,22 мкм (рис. 2).

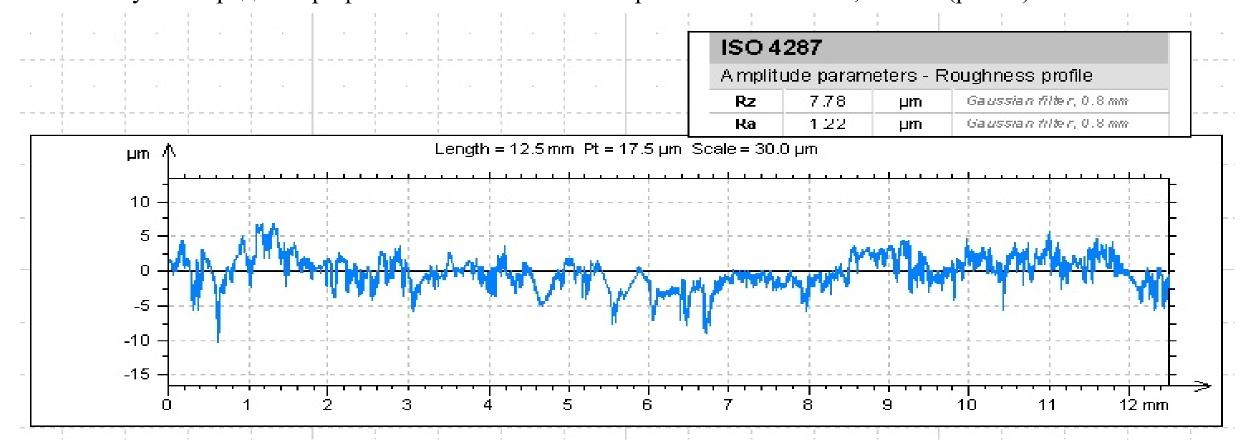


Рис. 2. Профилограмма поверхности образца, обработанного лепестковым кругом: скорость вращения — 1400 об/мин, подача — 315 мм/мин, динамический радиус круга ($r_Д$) — 55 мм

В результате экспериментов по обработке образцов из ПКМ гибкими лепестковыми кругами получена равномерная матовая поверхность, лишенная глянца. При этом целостность волокон не нарушена. Обработанную поверхность осмотрели и измерили шероховатость на профилометре *Tailor Hobson*. При выбранных режимах обработки получена шероховатость $Ra = 1{,}22$ мкм, которая показана на профилограмме (рис. 2).

Статистическая обработка данных экспериментальных исследований показала их высокую сходимость с результатами теоретических расчетов.

Обсуждение и заключение. Рассмотрены вопросы проектирования и оптимизации технологических процессов гидроабразивной резки ПКМ и подготовки их поверхности к склеиванию. Разработана методика, учитывающая заданные шероховатости поверхности реза и склеиваемой поверхности и обеспечивающая минимальную себестоимость изделия [1, 2, 10–11][1]. Шероховатость поверхности реза рассчитана по формуле (2). С учетом начальных параметров обработки ($P_{дин}$, R, $\rho_ч$, h, L, S, Q) рассчитывается число полезных соударений λ. Затем определяется значение шероховатости Ra. Отсеиваются варианты техпроцессов, при которых не выполняется условие $Ra \le Ra_{зад}$, и рассчитывается себестоимость реза. Оптимальной считается комбинация параметров обработки, при которой себестоимость реза будет минимальной.

Проектирование операции подготовки детали из ПКМ к склеиванию начинается с технологической оценки конструкции детали и клеевого соединения, в котором участвует эта деталь. Для каждого вида адгезива и выполняемого клеевого соединения разработчик должен указать необходимый класс шероховатости поверхности, подлежащей склеиванию. С учетом этого технолог выбирает зернистость шлифовального инструмента и режимы обработки. Полученная поверхность детали из ПКМ должна быть однородной и равномерно обработанной по всей поверхности склеивания. Качество обработки описывает среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости Ra. Замеры данного параметра проводятся при помощи профилометра щупового типа. При этом корректное назначение режимов обработки и правильный выбор инструмента позволяют обеспечивать необходимую величину шероховатости поверхности.

Деталь, поверхность которой готовят к склеиванию, должна быть очищена и свободна от остатков материалов опрессовки (разделительных материалов, материалов вакуумных мешков, герметиков и т. п.). Удаляются технологические припуски, которые не нужны на последующих операциях. Зашкуренная поверхность визуально проверяется на наличие наплывов, шагреней и других дефектов, подлежащих удалению.

Определяется шероховатость, которая обеспечит требуемую прочность клеевого соединения. В зависимости от нее выбирается зернистость абразивного круга. Для обработки тонкостенных изделий с недостаточной жесткостью при подготовке их поверхностей под склеивание рекомендуется использовать шлифовальные круги зернистостью 240, 220, 180 и 150 по FERA (Federation of the European Producers of Abrasives — Ассоциация европейских производителей абразивной продукции).

Для обработки деталей из ПКМ при наличии довольно толстого поверхностного эпоксидного слоя (0,01 мм и более) подойдет зернистость по FERA 40, 80, 100, 120. Для сошкуривания наплывов, шагреней, перепадов и т. п. с одновременной подготовкой поверхности к склеиванию рекомендуется использовать шлифовальные лепестковые круги зернистостью по FERA 80, 100, 120. Производительность такого процесса возрастает (если сравнивать с применением кругов меньшей зернистости).

Выбираются режимы обработки. Исходя из площади поверхности, подлежащей зашкуриванию, рассчитывается количество проходов инструмента. Отдельно следует сказать о деталях сложной формы с поверхностями, расположенными под углом, имеющими радиусы скругления и криволинейные участки элементов конструкций. Их обрабатывают в первую очередь, а уже затем переходят к плоским участкам. Детали с криволинейными поверхностями можно механически обрабатывать на высокотехнологичных станках и установках с программным управлением. В этом случае инструмент движется в соответствии с управляющей программой, а его траектория повторяет теоретический контур детали.

В таблице 1 приведены рекомендации по выбору режимов обработки для деталей из стеклопластика, которые в дальнейшем будут склеиваться. Оборудование — лепестковые круги фирмы *Klingspor*. Параметры

[1] Подашев Д. В. Оптимизация финишной обработки деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов эластичным абразивным инструментом : дис. … канд. тех. наук. Иркутск, 2014. 169 с.

процесса шлифования, обеспечивающие требуемую шероховатость: частота вращения круга *n* (об/мин), подача *S* (мм/мин) и $r_Д$ (мм).

Таблица 1

Рекомендации по выбору режимов резания при окончательной абразивной обработке деталей из ПКМ

Необходимая шероховатость	Зернистость материала		*Rc**, мм	*S*, мм/мин	*n*, об/мин
	лепесткового круга, рекомендованная по FERA	абразива по ГОСТ 3647–80			
4,5–5,0	P40	40	55	200–350	1400–1600
4,2–4,5	P80	20	55	200–350	1400–1600
3,7–4,2	P100	16	55	200–350	1400–1600
3,0–3,7	P120	12	50	200–400	1100–1400
2,6–3,0	P150	10	50	200–400	1100–1400
1,6–2,5	P180	8	50	200–400	1100–1400
1,2–1,6	P220	6	48	200–350	1100–1200
1,0–1,2	P240	5; M63	48	350–500	1100–1200
0,6–1,0	P320	5; M50	46	350–500	1100–1200
**Rc* указан для лепестковых кругов модели, рассматриваемых в данном исследовании.					

После окончания обработки поверхность детали очищается от продуктов зашкуривания с помощью чистой хлопчатобумажной салфетки или щетки-сметки с мягкой щетиной. При этом стеклопластиковая пыль не должна подниматься в воздух.

Визуальный контроль выявит необработанные участки (глянец на поверхности), а также оголения и разрушения волокон полимеркомпозита.

Библиографический список

1. Тамаркин, М. А. Повышение качества гидроабразивной резки деталей из авиационных материалов / М. А. Тамаркин, А. В. Верченко, А. А. Кишко // Вестник РГАТУ им. П. А. Соловьева. — 2017. — № 2 (41). — С. 88–96.

2. Верченко, А. В. Исследование шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке / А. В. Верченко, М. А. Тамаркин, А. А. Кишко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 2. — С. 116–130. DOI: https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-116-130

3. Щеголев, В. А. Эластичные абразивные и алмазные инструменты (теория, конструкция, применение) / В. А. Щеголев, М. Е. Уланова. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 184 с.

4. Новоселов, Ю. К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. — Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2012. — 304 с.

5. Гдалевич, А. И. Финишная обработка лепестковыми кругами / А. И. Гдалевич. — Москва : Машиностроение, 1990. — 112 с.

6. Козулько, Н. В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композитных материалов под операцию «склеивание» / Н. В. Козулько // Вестник Донского государственного технического университета. — 2018. — Т. 18, № 2. — С. 179–189. DOI: https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-2-179-189

7. Козулько, Н. В. Исследование процесса окончательной абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) / Н. В. Козулько, К. В. Семиниченко // Научно-технический вестник Поволжья. — 2019. — № 1. — С. 55–59.

8. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. — Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1989. — 320 с.

9. Tamarkin, M. A. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, A. S. Shvedova // Russian Engineering Research. — 2018. — Vol. 38, no. 9. — P. 726–727.

10. Optimization of the flat stock cutting process by hydroabrasive jet / M. A. Tamarkin, V. I. Butenko, A. N. Isaev, E. V. Murugova // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 226. — P. 232–235. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201822601025

11. Hamouda, K. Effect of the velocity of rotation in the process of vibration grinding on the surface state / K. Hamouda, H. Bournine, H. E. Amrou [et al.] // Materials Science. — 2016. — Vol. 52, no. 2. — P. 216–221.

Поступила в редакцию 01.06.2020
Запланирована в номер 31.08.2020

Об авторах:

Тамаркин Михаил Аркадьевич, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625, Scopus ID 6603762604, tehn_rostov@mail.ru

Тищенко Элина Эдуардовна, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5156-5544, Scopus ID 26640675300, lina_tishenko@mail.ru.

Верченко Алексей Викторович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2898-039X, Alex290292@mail.ru.

Троицкий Виктор Михайлович, аспирант кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8545-8816, mihailovich2313@mail.ru.

Заявленный вклад соавторов:

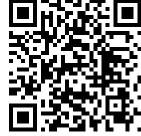
М. А. Тамаркин — научное руководство, формирование целей и задач исследований, корректировка выводов. Э. Э. Тищенко — анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов. А. В. Верченко — формирование основной концепции исследований, проведение экспериментов. В. М. Троицкий — проведение экспериментов и расчетов, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 625.54, 625.57, 621.86 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-243-251



Методика создания и применения цифрового двойника мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса

И. А. Лагерев[1], В. И. Таричко[2], А. В. Панфилов[3]

[1] ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского» (г. Брянск, Российская Федерация)

[2] АО «Брянский автомобильный завод» (г. Брянск, Российская Федерация)

[3] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Работа посвящена созданию и применению цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов (мобильных канатных дорог), оборудование которых смонтировано на базе колесных или гусеничных шасси большой грузоподъемности. Целью работы является повышение безопасности использования подобных транспортных систем на основе прогнозирования в режиме реального времени потенциальных отказов. Это позволяет своевременно предотвратить наступление аварийных ситуаций.

Материалы и методы. Предложена структура цифрового двойника мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. Разработаны подходы к анализу рабочих процессов с целью предотвращения аварийных ситуаций. В их основе лежит имитационное моделирование динамики системы с использованием новых комплексных математических моделей, построенных с использованием системного подхода.

Результаты исследования. Разработанная методика протестирована на базе масштабного макета мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса, созданного методами 3D-печати. Разработана математическая модель данной системы, с помощью которой построен цифровой двойник экспериментального макета. На примере случая буксования каната экспериментально показана возможность прогнозирования отказов в работе макета. Для этого сравнивалось реальное значение координаты точки подвеса груза, полученное с помощью метода обработки видеопотока, с прогнозируемым значением, вычисленным с помощью цифрового двойника.

Обсуждение и заключения. Результаты исследования позволяют создать промышленный цифровой двойник мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса, смонтированного на колесных шасси высокой проходимости.

Ключевые слова: канатная дорога, мобильный комплекс, подвес груза, буксование каната, цифровой двойник, создание, применение.

Для цитирования: Лагерев, И. А. Методика создания и применения цифрового двойника мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса / И. А. Лагерев, В. И. Таричко, А. В. Панфилов // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 243−251. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-243-251

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — докторов наук № МД-422.2020.8.



Methods of creating and using a digital twin of a mobile transport and transshipment rope complex

I. A. Lagerev[1], V. I. Tarichko[2], A. V. Panfilov[3]
[1] Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)
[2] Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)
[3] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The paper considers the creation and application of digital twins at various stages of the life cycle of mobile transport and transshipment rope complexes (mobile ropeways), the equipment of which is mounted on the basis of wheeled or tracked chassis of high load capacity. The work objective is to improve safety in using such transport systems based on real-time forecasting of potential failures. This will prevent the occurrence of emergencies in a timely manner.
Materials and Methods. The structure of the digital twin of the mobile transport and transshipment rope complex is proposed. Approaches to the analysis of ongoing work processes in order to prevent accidents have been developed. They are based on simulation modeling of the system dynamics using new complex mathematical models built through the system approach.
Results. The developed method was tested on a large-scale layout of a mobile transport and transshipment rope complex created by 3D printing methods. A mathematical model of this system was developed; it was used to construct a digital double of the experimental model. The possibility of predicting failures in the layout is shown experimentally through the example of a rope slipping case. To do this, the actual value of the load suspension point coordinate obtained through the video stream processing method was compared to the predicted value calculated using a digital twin.
Discussion and Conclusions. The research results provide the creation of an industrial digital twin of a mobile transport and transshipment rope complex mounted on cross-country wheeled chassis.

Keywords: ropeway, mobile complex, suspension of load, digital twin, creation, applying.

For citation: I. A. Lagerev, V. I. Tarichko, A. V. Panfilov. Methods of creating and using a digital twin of a mobile transport and transshipment rope complex. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 243−251. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-243-251

Funding information: the research is done with the financial support from the Grant of President of the Russian Federation no. МД-422.2020.8 for young Russian scientists — Doctors of Sciences.

Введение. Предложены концепции создания нового поколения канатных транспортных систем. К ним относятся городские пассажирские канатные транспортные системы на основе технологии «Канатное метро» [1, 2] и мобильные транспортно-перегрузочные канатные комплексы (МТПКК) [2–5]. Комплекс (рис. 1) представляет собой несколько базовых станций канатной дороги, оборудование которых смонтировано на мобильных шасси [2, 3].

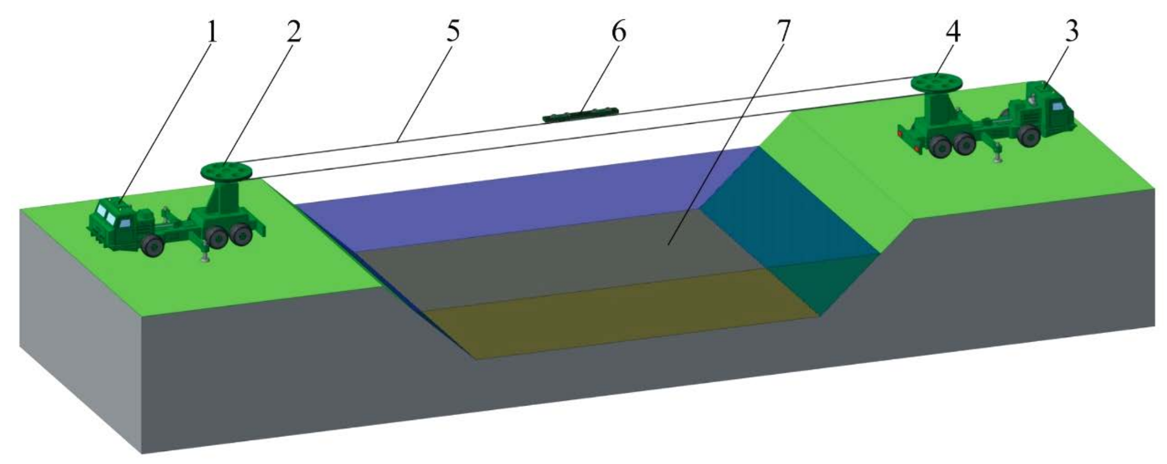


Рис. 1. Схема мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса [2, 6]:
1 — приводная базовая станция на основе колесного шасси; 2 — приводной шкив; 3 — неприводная базовая станция; 4 — неприводной шкив с механизмом натяжения каната; 5 — кольцевой тягово-приводной канат; 6 — каретка для подвески груза; 7 — преодолеваемое препятствие

Для успешной реализации данной идеи необходима разработка научных основ исследования рабочих процессов и проектирования МТПКК. При этом предстоит решить научно-технические задачи обеспечения

общий устойчивости базовых станций, монтажа и натяжения канатной системы, погрузки и разгрузки канатной дороги [2].

В условиях цифровизации промышленного производства необходима разработка высокоточных цифровых двойников МТПКК, позволяющих создавать эффективные и конкурентоспособные в мировом масштабе образцы продукции.

Материалы и методы. Активная разработка системных цифровых моделей, которые можно считать прообразом цифровых двойников, началась с внедрением систем автоматизированного проектирования, поддерживающих основные этапы жизненного цикла промышленного изделия. Широко известна взаимосвязь этапов жизненного цикла и основных видов систем автоматизированного проектирования (рис. 2) [7].

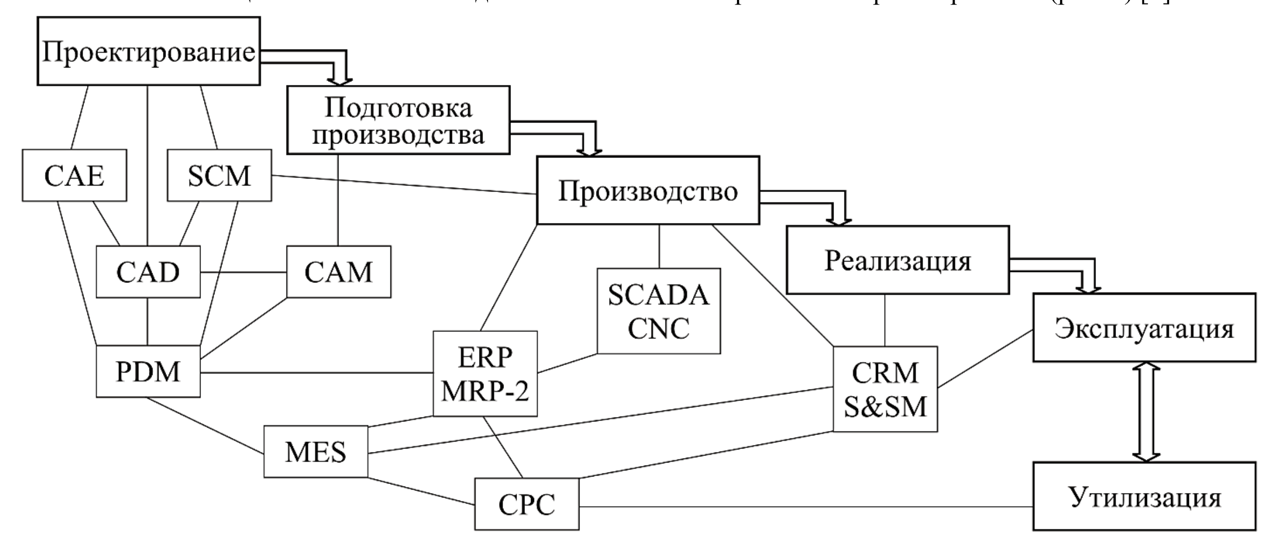


Рис. 2. Взаимосвязь этапов жизненного цикла промышленного изделия и основных систем автоматизированного проектирования

Создание системной цифровой модели начинается с определения внешнего облика (геометрии) объекта в CAD-системе. Затем в CAE-системах выполняются необходимые расчеты динамики, прочности, устойчивости, работоспособности проектируемого объекта, а в CAM-системах разрабатываются технологические документы и готовятся программы для станков с числовым программным управлением. SCM-системы позволяют при проектировании учесть возможность применения покупных изделий, а на этапе производства — обеспечить их своевременную поставку. Перечисленные системы автоматизированного проектирования интегрируются на уровне PDM-систем, управляющих процессами проектирования и подготовки производства. В производственных цехах SCADA-системы обеспечивают диспетчеризацию производственных процессов, а CNC-системы управляют технологическим оборудованием, в том числе станками с числовым программным управлением. Последние две системы интегрируются на уровне MES-системы, управляющей процессами производства. Системы ERP и MRP-2 позволяют обеспечить предприятие необходимыми ресурсами. На этапе реализации и эксплуатации взаимодействие с потребителями выполняется с помощью CRM-систем продаж и S&SM-систем обслуживания и ремонта. Интеграция всех перечисленных систем лежит в основе цифрового бизнеса (CPC), который также называют цифровым предприятием [7].

Анализ схемы (рис. 2) показывает, что существующие цифровые двойники промышленных изделий имеют наибольшую детализацию при использовании на этапах проектирования и производства. При этом рабочие процессы, протекающие на этапе эксплуатации промышленного изделия, учитываются при проектировании в виде исходных данных, представленных в виде числовых значений или законов распределения. В первую очередь к таким данным можно отнести внешние нагрузки и другие воздействия, последовательности рабочих операций. В рамках данного подхода [7] после изготовления промышленное изделие становится товаром, для которого в большей степени важны не технические, а экономические свойства: объемы продаж, цена, количество и характер претензий по гарантийному обслуживанию, отзывы покупателей, параметры документов купли-продажи. Поэтому на этапе эксплуатации разработанные в ходе проектирования и производства детализированные цифровые двойники, как правило, не используются. Они могут применяться при капитальном ремонте или модернизации промышленного изделия, однако в этом случае оно выводится из эксплуатации и возвращается на предприятие-изготовитель или специализированное ремонтное предприятие. Данный вывод также подтверждается тем, что 11 из 14 систем автоматизированного проектирования, представленных на рис. 2, связаны с проектированием и изготовлением.

В условиях цифровизации промышленного производства такой подход является недостаточным, т. к. производитель промышленных изделий не обладает необходимыми данными для совершенствования конструкции, алгоритмов управления и технологии производства конкурентоспособной продукции, а потребитель не обладает полнотой информации об эксплуатируемом изделии. При этом активное внедрение цифровых двойников на этапе эксплуатации промышленного изделия позволит решить две основные задачи:

— эксплуатационная задача заключается в том, чтобы учесть возможные нештатные и аварийные режимы, которые нужно избегать в эксплуатации готового изделия;

— проектно-конструкторская задача ориентирована на создание новых конструкций и алгоритмов программного управления с учётом массива статистических данных и математических моделей, формируемых в ходе эксплуатации промышленных изделий.

Одновременно с этим важную роль играет постоянная актуализация цифрового двойника объекта, находящегося в эксплуатации. Таким образом, необходимо использовать разработанные высокоточные цифровые двойники на всех этапах жизненного цикла промышленного изделия [8, 9].

Для этого разработанные математические модели, лежащие в основе цифрового двойника, в режиме реального времени обрабатываются на быстродействующих компьютерах. В качестве исходных данных для расчета используются сигналы с датчиков, установленных на реальном объекте (рис. 3). Цифровой двойник связан с реальным объектом через облачный сервис. Такой подход позволяет повысить эффективность и безопасность эксплуатации промышленного изделия, выявить скрытые явления и эффекты, собрать материал для дальнейшей модернизации и повышения потребительских качеств, предотвратить аварийные ситуации [8, 9].

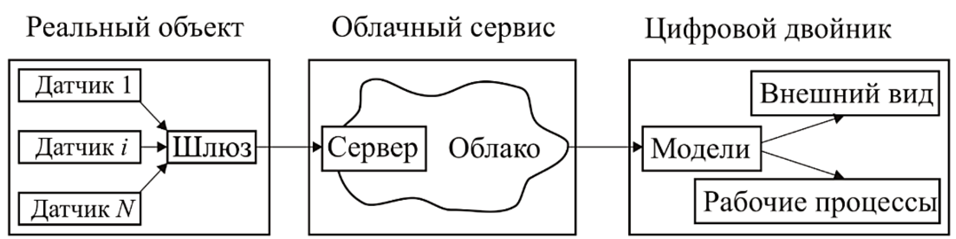


Рис. 3. Взаимосвязь промышленного изделия и его цифрового двойника

Таким образом, цифровой двойник — это программный аналог физического устройства (промышленного изделия), моделирующий в режиме реального времени внутренние процессы, технические характеристики и поведение устройства в условиях влияния случайных воздействий и окружающей среды, параметры которых передаются с датчиков реального устройства, работающего параллельно [8, 9]. Цифровой двойник содержит в себе математические модели внешнего вида и рабочих процессов объекта. При этом размеры и характеристики внешнего вида используются для вычисления исходных параметров математических моделей, описывающих рабочие процессы. Например, момент инерции элемента механизма вычисляется на основе его геометрической модели. Затем полученное значение момента инерции транслируется в дифференциальное уравнение движения элемента.

Для построения математических моделей рабочих процессов промышленного изделия рекомендуется использовать системный подход [10], согласно которому каждому значащему элементу системы ставится в соответствие математическая подмодель, связанная с подмоделями других элементов с помощью совместных параметров и уравнений связи. Такой подход позволяет создавать удобные в использовании модульные математические модели, учитывать наличие обратных связей между элементами системы.

Данная статья посвящена созданию и использованию на этапе эксплуатации цифрового двойника мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. Другие этапы жизненного цикла МТПКК не рассматриваются, так как для них используются общие подходы, применяемые для любых машин и оборудования. Считается, что для разработки цифрового двойника имеются полные комплекты трехмерных компьютерных геометрических моделей МТПКК и конструкторско-технологической документации, разработанной на этапе проектирования и подготовки производства.

Рассмотрим варианты применения цифрового двойника для предотвращения аварийных ситуаций при эксплуатации мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. Пусть $\{a\}$ — вектор параметров реального объекта, получаемых с помощью средств объективного контроля (датчиков, подключенных к измерительным системам). Эти параметры описывают текущее состояние МТПКК и характер протекающих рабочих процессов в текущий момент времени t_i. Значения параметров $\{a\}$ определяются периодически, через определенное время Δt. Параметрам, получаемым с физического объекта, соответствуют параметры $\{x\}$,

вычисляемые с помощью математической модели. Результаты моделирования рабочих процессов записываются в матрицу [X], которая содержит информацию об изменении моделируемых параметров во времени. Моделирование параметров выполняется различными пошаговыми численными методами, при этом величина шага вычисления по модельному времени t_m равна Δt_m.

Параметры $\{a\}$ в каждый текущий момент времени t_i передаются на вход математической модели, с помощью которой выполняется моделирование рабочих процессов МТПКК на заданный период времени T. Также при расчете используется информация о внешнем виде (конструкции) реального объекта. В результате расчета в режиме реального времени получаются значения [X], по результатам анализа которых происходит оценка (прогноз) возможности наступления аварийной ситуации. Если по результатам моделирования прогнозируется наступление аварийной ситуации, то МТПКК немедленно останавливается или принимаются иные меры по предотвращению аварии.

Взаимосвязь реального объекта и цифрового двойника наглядно проиллюстрирована на рис. 4.

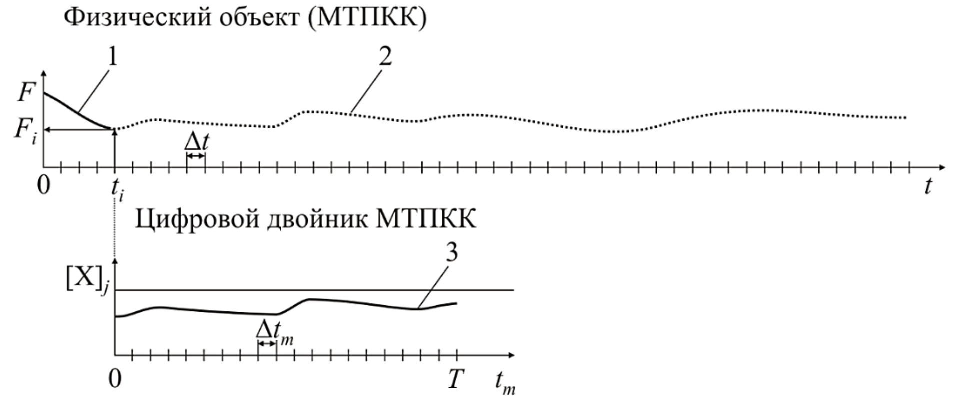


Рис. 4. Визуализация изменения рабочего процесса с помощью средств объективного контроля за реальным объектом и с помощью цифрового двойника: 1 — фактическое изменение параметра до момента t_i;
2 — фактическое изменение параметра реального объекта в будущем; 3 — результат моделирования изменения параметра в будущем с помощью цифрового двойника

Один из параметров вектора $\{a\}$, например сила натяжения несущего каната F, определяется с помощью силоизмерительного датчика с периодичностью Δt. В текущий момент времени сила натяжения имеет значение F_i. Аналогичным образом определяются и другие компоненты a_i вектора $\{a\}$, которые передаются для анализа с помощью цифрового двойника.

Силе натяжения соответствует j-я строка матрицы [X]. Если по результатам моделирования рабочих процессов МТПКК не выявлена возможность аварийной ситуации, то работа МТПКК не прекращается. На следующей итерации в момент времени $t_i + \Delta t$ определяются новые значения вектора $\{a\}$, после чего выполняется новый сеанс моделирования. В случае негативного прогноза, например, если расчетная сила натяжения превысит допускаемое значение, то работа МТПКК прекращается до выяснения причин и устранения угрозы аварийной ситуации.

Для повышения точности прогноза необходимо использовать адекватные математические модели. Критерием точности может служить отклонение результата моделирования (участок 3 на рис. 4) от реального поведения объекта (участок 2 на рис. 4). В идеальном случае прогноз по изменению параметров должен полностью совпадать с фактическим изменением параметров в будущем.

В ходе исследования использовалась комплексная математическая модель, лежащая в основе цифрового двойника МТПКК [10]. Уравнения движения, входящие в эту модель, в общем виде можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} [M]\{\ddot{x}\} + [B]\{\dot{x}\} + [C]\{x\} = \{P\}, \\ [Y] = \{0\}, \end{cases}$$

где $\{x\}$ — вектор законов движения элементов системы (изменения их координат во времени); $\{\dot{x}\}$ — вектор скоростей элементов системы; $\{\ddot{x}\}$ — вектор ускорений элементов системы; $[M]$ — матрица инерционных параметров, зависящая от масс и моментов инерции элементов системы; $[B]$ — матрица коэффициентов диссипации; $[C]$ — матрица упругости, зависящая от жесткости элементов системы; $\{P\}$ — вектор внешних нагрузок на элементы системы; $[Y]$ — матрица алгебраических уравнений связи параметров системы:

$$F_i = F\left(\{x\},\{\dot{x}\},\{\ddot{x}\}\right)\ [10].$$

Рассмотренный подход позволяет спрогнозировать и предотвратить наступление аварийных ситуаций:

— обрыв троса из-за превышения тягового усилия;

— сход каната со шкива;

— падение базовой станции из-за потери общей устойчивости;

— остановка привода канатной дороги с самораскачкой;

— отцепка кабины канатной дороги со скатыванием по канату и столкновением с другой кабиной или опорой;

— удар кабины об опору или оборудование базовой станции;

— сильная боковая качка при воздействии ветра.

Результаты исследования. Как было указано, цифровой двойник должен взаимодействовать с физическим объектом. Но мобильные транспортно-перегрузочные канатные комплексы являются перспективным видом транспортных систем, поэтому в настоящий момент их полноразмерные экспериментальные образцы отсутствуют. На данном этапе исследований для отработки методики создания цифрового двойника был создан масштабный натурный макет МТПКК, данные о работе которого передавались на вход цифрового двойника. Макет комплекса, изготовленный на базе Инжинирингового научно-образовательного центра цифровых технологий Индустрии 4.0 Брянского государственного университета имени академика И. Г. Петровского, представлен на рис. 5.

В качестве контролируемого параметра выбрана координата точки подвеса груза z. Центр координат расположен на оси вращения приводного шкива, а ось координат соединяет центры шкивов канатной дороги. Текущее значение координаты на реальном объекте определялось с помощью программного обеспечения Kinovea, позволяющего анализировать данные видеосъемки.

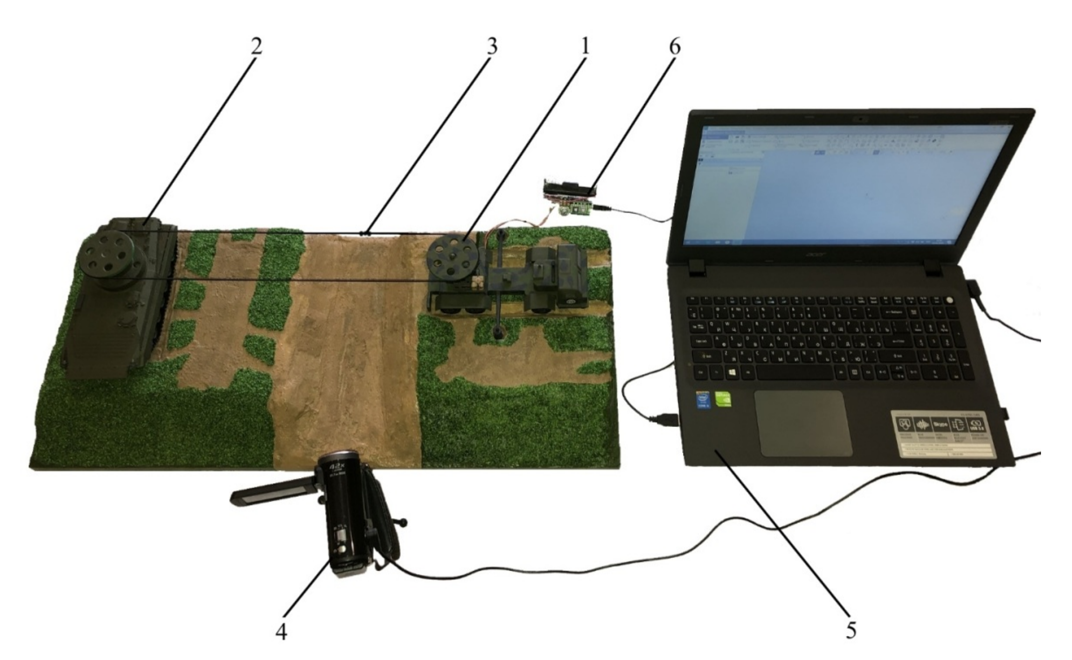


Рис. 5. Масштабный натурный макет МТПКК:
1 — приводная базовая станция; 2 — неприводная базовая станция; 3 — груз на подвеске; 4 — видеокамера; 5 — ноутбук для обработки сигналов и моделирования; 6 — система управления макетом на базе микроконтроллера

Прогнозируемая координата точки подвеса груза вычислялась с помощью модели, представленной на рис. 6.

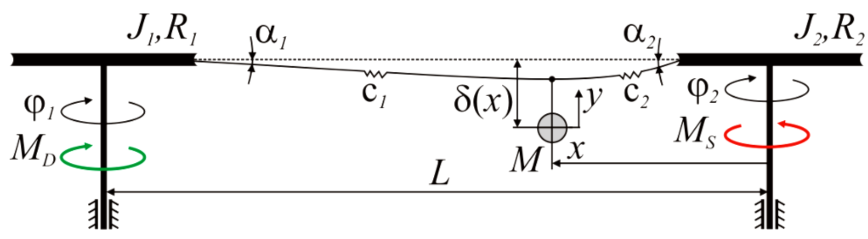


Рис. 6. Расчетная модель для исследования рабочих процессов макета

На стадии разгона канатной системы, когда скорость груза $\dot{x}$ меньше номинального значения $x_{ном} = 0{,}013$ м/с, соответствующего установившемуся движению, уравнения движения элементов системы выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} J_1\ddot{\phi}_1 + c_1\left(\phi_1 - \dfrac{x}{R_1\cos\alpha_1} + \left(\delta(x) - y\right)\dfrac{\sin\alpha_1}{R_1}\right)\cos\alpha_1 = M_D(\dot{\phi}_1); \\ J_2\ddot{\phi}_2 - c_2\left(\phi_2 - \dfrac{x}{R_2\cos\alpha_2} + \left(\delta(x) - y\right)\dfrac{\sin\alpha_2}{R_2}\right)\cos\phi_2 = -M_S(\dot{\phi}_2); \\ M\ddot{x} - c_1\left(R_1\phi_1 - \dfrac{x}{\cos\alpha_1} + \left(\delta(x) - y\right)\sin\alpha_1\right)\cos\alpha_1 - \\ -c_2\left(R_2\phi_2 - \dfrac{x}{\cos\alpha_2} + \left(\delta(x) - y\right)\sin\alpha_2\right)\cos\alpha_2 = 0; \\ M\ddot{y} + c_1\left(R_1\phi_1 - \dfrac{x}{\cos\alpha_1} + \left(\delta(x) - y\right)\sin\alpha_1\right)\sin\alpha_1 - \\ -c_2\left(R_2\phi_2 - \dfrac{x}{\cos\alpha_2} + \left(\delta(x) - y\right)\sin\alpha_2\right)\sin\alpha_2 = -9{,}81M, \end{cases}$$

где ϕ_1, J_1 — угол поворота, момент инерции ведущего шкива соответственно; ϕ_2, J_2 — угол поворота, момент инерции ведомого шкива соответственно; x, y — горизонтальная, вертикальная координаты груза соответственно; M — масса груза; c_1 и c_2 — жесткость каната в области приводного и неприводного шкива соответственно; α_1 и α_2 — угол наклона каната в области приводного и неприводного шкива соответственно; R_1 и R_2 — радиус приводного и неприводного шкива соответственно; L — расстояние между осями вращения шкивов (пролет канатной дороги).

Углы наклона ветвей каната:

$$\alpha_1 = \alpha_1(x) = a\sin\left(\frac{\delta(x)}{x}\right) \text{ при } x \neq 0,\ \alpha_1 = 0 \text{ при } x = 0;$$

$$\alpha_2 = \alpha_2(x) = a\sin\left(\frac{\delta(x)}{L - x}\right) \text{ при } x \neq 0,\ \alpha_2 = 0 \text{ при } x = L,$$

где зависимость стрелы прогиба каната от положения груза в пролете канатной дороги определена на натурном макете и имеет следующий вид:

$$\delta(x) = 0{,}003\sin(\pi x / L) \text{ м.}$$

Жесткости элементов макета определяются следующим образом:

$$c_{x1} = c_{x2} = 100 \text{ Н/м; } c_1 = c_{x1} / R_1;\ c_2 = c_{x2} / R_2.$$

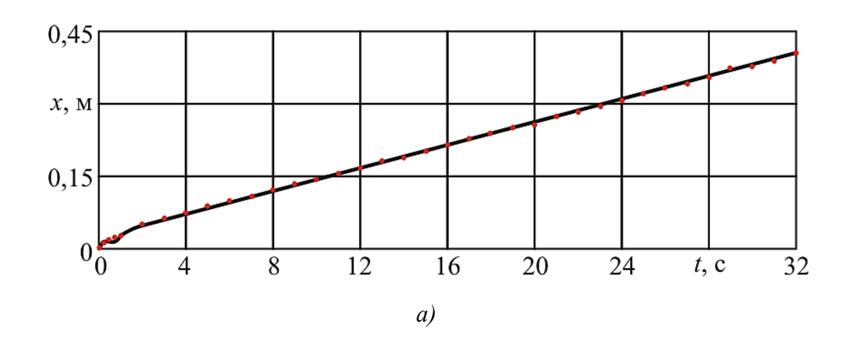
Далее приведем значения прочих параметров модели: $J_1 = J_2 = 0{,}059$ кгм; $M = 0{,}025$ кг; $L = 0{,}395$ м; $R_1 = R_2 = 0{,}03$ м; $M_D = 34{,}3 \cdot 10^{-3}$ Нм; $M_S = 0{,}15 \cdot 10^{-3}$ Нм.

На стадии установившегося движения используется закон движения:

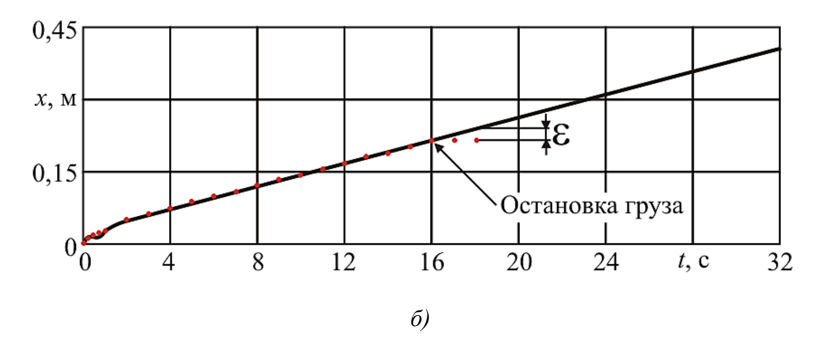
$$x = x_0 + x_{ном}t,$$

где x_0 — координата положения груза, соответствующая окончанию переходного процесса и началу установившегося движения.

На рис. 7 продемонстрирована реальная траектория движения точки подвеса груза и результаты ее моделирования с помощью цифрового двойника. В случае принудительной остановки канатной системы путем удержания груза происходило отклонение реального положения груза от прогнозируемого с использованием цифрового двойника. Этот факт фиксировался системой управления макета, при этом определялось отклонение ε, что позволяло выявить аварийную ситуацию типа «буксование каната».



а)



б)

Рис. 7. Результаты моделирования с использованием цифрового двойника:
а — нормальное движение; *б* — случай принудительной остановки каната;
—— — результат моделирования; • — экспериментальные значения

Обсуждение и заключения. Применение рассмотренной методологии создания цифровых двойников позволило на примере натурного макета канатной дороги выявлять отклонения от нормальной работы с целью предотвращения нештатных и аварийных ситуаций. В ходе дальнейших исследований на базе рассмотренной методологии будет создан промышленный цифровой двойник мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. При этом будут построены модели аварийных ситуаций.

Библиографический список

1. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» / А. В. Лагерев, И. А. Лагерев, А. А. Короткий, А. В. Панфилов // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2012. — № 3. — С. 12–15.

2. Транспортно-логистические технологии и машины для цифровой урбанизированной среды / А. А. Короткий, А. В. Лагерев, Б. Ч. Месхи [и др.]; под общ. ред. А. В. Лагерева. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2019. — 268 с.

3. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро / А. А. Короткий, А. В. Лагерев, Б. Ч. Месхи [и др.]. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2017. — 344 с.

4. Кудакаев, Т. З. Использование грузовых кабель-кранов для работы в сложных условиях. Опыт применения в России / Т. З. Кудакаев // Инженерная защита. — 2014. — № 5. — С. 62–67.

5. Дьячкова, О. М. Сферы применения городского пассажирского транспорта / О. М. Дьячкова, П. П. Володькин // Ученые заметки ТОГУ. — 2013. — Т. 4. — № 4. — С. 1492–1501. — URL: http://pnu.edu.ru/ejournal/pub/issues/14/ (дата обращения: 29.08.2020).

6. Лагерев, А. В. Обеспечение общей устойчивости базовых колесных станций мобильных канатных дорог / А. В. Лагерев, В. И. Таричко, С. П. Солдатченков // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2019. — № 2. — С. 210–220.

7. Норенков, И. П. Автоматизированные информационные системы : учебник для вузов / И. П. Норенков. — Москва : Изд-во Мос. гос. тех ун-та им. Н. Э. Баумана. — 2011. — 344 с.

8. Кокорев, Д. С. Цифровые двойники: Понятие, типы и преимущества для бизнеса / Д. С. Кокорев, А. А. Юрин // Colloquium-journal. — 2019. — № 10−2. — С. 101–104.

9. Васильев, А. Н. Методы создания цифровых двойников на основе нейросетевого моделирования / А. Н. Васильев, Д. А. Тархов, Г. Ф. Малыхина // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2018. — Т. 14. — № 3. — С. 521–532.

10. Таричко, В. И. Комплексная математическая модель мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса / В. И. Таричко, А. В. Химич // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2019. — № 4. — С. 523–532.

Сдана в редакцию 08.06.2020
Запланирована в номер 20.08.2020

Об авторах:

Лагерев Игорь Александрович, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВО Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского (241023, РФ, г. Брянск, ул. Бежицкая, д. 14), доктор технических наук, доцент, ResearcherID: W-3063-2018, ScopusID: 56436754400, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0921-6831, lagerev-bgu@yandex.ru

Таричко Вадим Игоревич, заместитель генерального директора — главный конструктор АО «Брянский автомобильный завод» (241038, РФ, г. Брянск, ул. Сталелитейная, д. 1), кандидат технических наук, ScopusID: 57212305096, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0286-725X, 32.6909@mail.ru

Панфилов Алексей Викторович, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (346428, РФ, г. Новочеркасск, ул. Троицкая, д. 88), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: A-5035-2014, ScopusID: 57216301201, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7211-1824, panfilov@ikcmysl.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. А. Лагерев — разработка общей концепции, научное редактирование, доработка текста, оформление работы. В. И. Таричко — создание 3D-макета мобильной канатной дороги и проведение натурного эксперимента, подготовка материалов для рукописи. А. В. Панфилов — разработка математической модели цифрового двойника макета мобильной канатной дороги, подготовка материалов для рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.052:539.015 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-252-258



Способы и технологии электрошлаковой сварки с регулируемым термическим циклом

Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев, А. Н. Грицына, Р. Б. Агулиев
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Повышение качества и эксплуатационной надежности конструкций энергетического оборудования является актуальной задачей сварочного производства. Её решение возможно на основе разработки или выбора прогрессивных способов и технологий электрошлаковой сварки (ЭШС), устраняющих причины образования трещин отпуска (ТО) в толстолистовых сварных соединениях. Настоящая работа посвящена сравнительной оценке рекомендаций по выбору подобных прогрессивных способов ЭШС. Целями работы являлись решение проблем формирования мелкозернистой, однородной, устойчивой против образования трещин, структуры металла сварного соединения с высокими механическими характеристиками и снижения негативного влияния термического цикла ЭШС на основной металл. Решение этих проблем возможно на основе обоснованного выбора способов и технологий ЭШС с регулируемым (управляемым) термическим циклом.
Материалы и методы. Проведён обзор прогрессивных способов и технологий ЭШС с управляемым термическим циклом; выполнено сравнение их достоинств и недостатков; предложены практические рекомендации по выбору прогрессивных методов управления параметрами термического цикла.
Результаты исследования. Показано, что умеренное тепловложение при скоростной ЭШС в узкую разделку позволяет за один проход сформировать сварное соединение с более мелкозернистой структурой и высокими механическими свойствами по сравнению со штатными технологиями ЭШС и автоматической сварки под флюсом. Даны рекомендации по практическому использованию способа в сварочном производстве.
Обсуждение и заключение. Полученные результаты рекомендуется использовать при разработке технологии ЭШС толстолистовых сварных конструкций атомного и теплоэнергетического оборудования, позволяющей отказаться от послесварочной термической обработки в виде нормализации и высокого отпуска.

Ключевые слова: ЭШС, электрошлаковая сварка, способ электрошлаковой сварки, термический цикл сварки, сварное соединение, сварка в узкую разделку, структура, свойства.

Для цитирования: Способы и технологии электрошлаковой сварки с регулируемым термическим циклом / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев, А. Н. Грицына, Р. Б. Агулиев // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 252−258. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-252-258



Methods and technologies of electroslag welding with controlled thermal cycle

Yu. V. Poletaev, V. Yu. Poletaev, A. N. Gritsyna, R. B. Aguliev
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. Improving the quality and operational reliability of welded structures of power equipment is an urgent task of welding production. Its solution is possible on the basis of the development or selection of advanced methods and technologies of electroslag welding (ESW), which eliminate the causes of the formation of tempering cracks (TC) in thick-plate welds. This paper considers a comparative assessment and recommendations on the selection of such advanced ESW methods. The work objectives are to solve the problem of forming a fine-grained, uniform, crack-resistant metal structure of a welded joint with high mechanical characteristics and to reduce the negative

impact of the ESW thermal cycle on the base metal. The solution to this problem is possible on the basis of a reasonable choice of methods and technologies for ESW with regulated (controlled) thermal cycle.
Materials and Methods. A comparative analysis of advanced methods and technologies of ESW with a controlled thermal cycle is carried out; a comparison of their pros and cons is provided; practical recommendations on the selection of advanced methods for controlling the thermal cycle parameters are offered.
Results. It is shown that moderate heat input at high-speed ESW in a narrow gap provides a single pass to form a welded joint with a finer-grained structure and high mechanical properties compared to the in-house technologies of ESW and automatic submerged-arc welding. Recommendations for practical use of the method in welding production are given.
Discussion and Conclusions. The results obtained are recommended to be used in the development of ESW technology for thick-sheet welded structures of nuclear and thermal power equipment that enables to abandon post-welding heat treatment (normalization and high tempering).

Keywords: ESW, electroslag welding, slag welding method, thermal cycle of welding, welding joint, narrow-gap welding, structure, properties.

For citation: Yu.V. Poletaev, V.Yu. Poletaev, et al. Methods and technologies of electroslag welding with controlled thermal cycle. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 252−258. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-252-258

Введение. Электрошлаковая сварка является высокопроизводительным процессом производства толстостенных сварных конструкций энергетического оборудования. Однако получение однородной структуры, обеспечивающей высокие механические свойства сварных соединений достигается только после полной термической обработки в виде нормализации и высокого отпуска. Более того, крупнозернистый металл сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) имеет низкую стойкость против образования трещин при сварке и термической обработке в виде отпуска.

Актуальность проблемы определяется тем, что ТО (рис. 1) выявляются на стадии изготовления и эксплуатации сварной конструкции неожиданно, приводят к аварийным ситуациям и значительным материальным затратам [1].

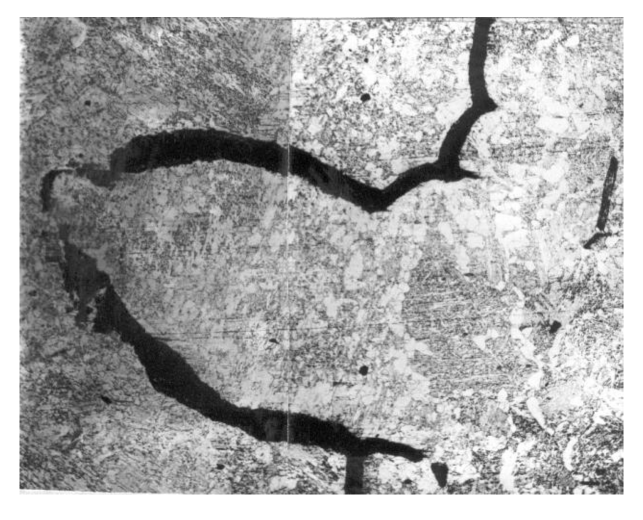


Рис. 1. Характер ТО в электрошлаковом сварном соединении низколегированной стали, ×100

Исследованиями отечественных и зарубежных ученых Э. Л. Макарова, В. Н. Земзина, Ю. В. Полетаева, А. С. Зубченко, И. Гривняка, F. Muller, R. Cadman, J. Tanaka, H. Nakamura и других показано [2–9], что тенденция к образованию трещин при сварке заметно возрастает в результате комбинированного воздействия неблагоприятного теплового цикла ЭШС и охрупчивания структуры.

Материалы и методы. Разработанные методы воздействия на тепловой режим ЭШС основаны на регулировании основных параметров цикла термической сварки: максимальной температуры нагрева, продолжительности пребывания металла при температуре выше температуры начала интенсивного роста зерна, скорости охлаждения и др. Например, увеличения скорости охлаждения с целью формирования мелкозернистой структуры сварного соединения можно достичь при введении в сварочную ванну дополнительных присадочных материалов: проволоки, пучка проволок, плавящегося мундштука, гранулированной металлической присадки, металлического порошка и др. Подобный эффект может быть

достигнут при сопутствующем подогреве металла шва и ЗТВ для местной непрерывной нормализации. Повышение качества и технологической прочности металла шва при ЭШС достигается при использовании флюсов пониженной основности [10, 11]. Эффективным следует считать метод воздействия внешними магнитными полями на металл сварного шва.

Решение широкого спектра задач, из которых суммируется технология ЭШС, связано со свойствами шлаковой и металлической ванн, а также с возможностями управления кристаллизацией сварного шва с помощью создаваемых в нем магнитных гидродинамических (МГД) течений. Природа МГД-течений зависит главным образом от электрического тока, проходящего через расплав и взаимодействующих с этим током магнитных полей. Применение управляемых МГД-течений позволяет повысить качество, механические свойства и технологическую прочность сварных соединений за счет оптимизации формы металлической ванны, измельчения структуры металла и повышения стойкости против образования ТО. Более высокие значения пластичности и ударной вязкости металла, полученные с использованием управляемых МГД-течений, позволили в ряде случаев исключить послесварочную термическую обработку.

Результаты исследования. Электромагнитное перемешивание жидкого металла осуществляется с помощью магнитных полей, создаваемых соленоидом или электромагнитами (рис. 2). Это поле взаимодействует с расплавом сварочной ванны и осуществляет регулирование теплового режима металла сварного шва. При этом достигается снижение погонной энергии при сварке, времени пребывания кристаллизующегося металла выше температуры начала интенсивного роста зерна, размера дендритов.

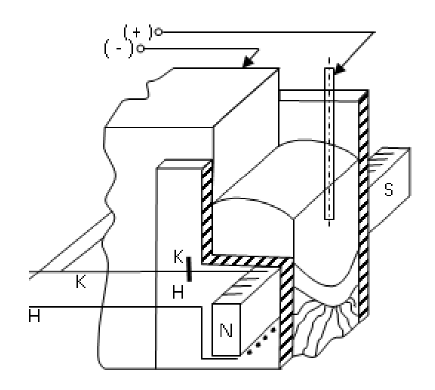
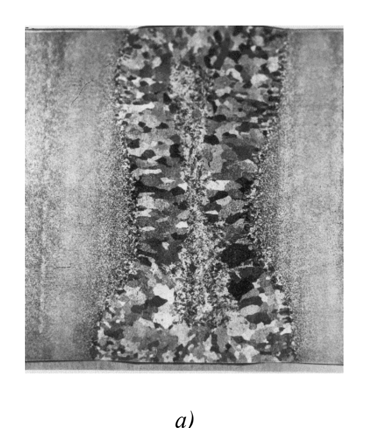
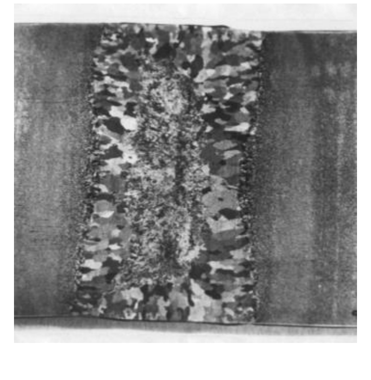


Рис. 2. Схема ЭШС с электромагнитами, смонтированными на формирующих устройствах[1]

На рис. 3 можно увидеть различие в макростроении сварных соединений, выполненных по штатной технологии ЭШС и с воздействием магнитного поля. Следует отметить, что в случае штатной технологии (рис 3 *а*) средняя толщина сварного шва и его ширина значительно меньше, чем при воздействии магнитного поля. Площадь большого перегретого зерна зоны теплового воздействия самая большая и достигает 5−7 мм. Для сравнения, размер его поверхности не превышает 1−2 мм, а зона крупных столбчатых кристаллов доходит почти до середины шва. Поэтому в центральной части шва площадь относительно небольших равноосных зерен имеет длину всего 3−4 мм.



а)



б)

Рис. 3. Макроструктура электрошлакового сварного соединения, выполненного по штатной технологии (*а*) и с воздействием магнитного поля (*б*), ×100

[1] Полетаев, В. Ю. Способы повышения качества сварных соединений, выполненных электрошлаковой сваркой (обзор) // Актуальные проблемы науки 21 века : сб. стат. 5 междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург : Cognitio, 2015. Ч. 2. С. 131–139.

Под воздействием магнитного поля наблюдается заметное улучшение макроструктуры и, прежде всего, уменьшение зоны крупных столбчатых кристаллов (рис. 3 *б*), зона равноосных относительно мелких кристаллов в центре шва имеет длину 25−30 мм, что составляет более 50 % от ширины шва. Для сварного соединения, выполненного под флюсом АН-8, эта зона несколько меньше и составляет 16−20 мм. У всех проб размер крупных столбчатых кристаллов металла шва достигает 10−11 мм. Уменьшение размера зоны крупных столбчатых кристаллов должно способствовать повышению механических и, прежде всего, пластических свойств[2].

Сущность способа скоростной ЭШС заключается в программном изменении с заданной частотой мест токоподвода к электродам и свариваемым кромкам (рис. 4).

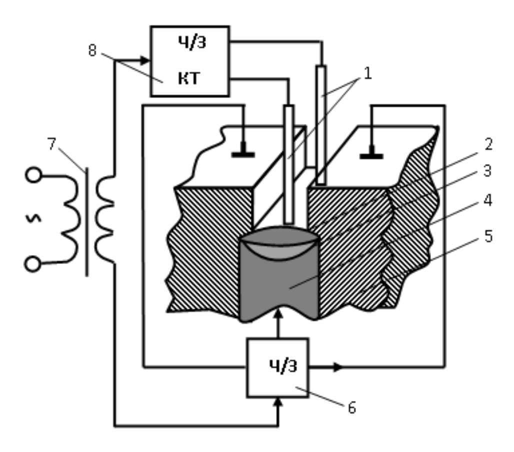


Рис. 4. Схема ЭШС с коммутацией токоподводов: 1 — электроды; 2 — шлаковая ванна; 3 — металлическая ванна; 4 — сварной шов; 5 — изделие; 6 — трехканальный преобразователь тока; 7 — источник питания; 8 — двухканальный коммутатор тока

Переключение токоподводов во время сварки приводит к периодическим изменениям направления линий электрического тока в сварочной ванне [12]. В то же время характер движения шлаково-металлического расплава и, соответственно, температурный баланс в ванне резко меняются. Большая часть энергии используется для расплавления электродов, в то время как меньшая часть передается основному металлу. Все это увеличивает скорость плавления электродов в 3−4 раза и сводит к минимуму степень отвода тепла к стенкам основного металла. Флуктуации жидкой фазы относительно твердой уменьшают градиент температуры на границе раздела фаз, приостанавливают рост кристаллов и нарушают частоту и направление дендритной кристаллизации. Развитие этих процессов способствует формированию более мелкозернистой структуры с высокими механическими свойствами, без высокотемпературной термообработки.

Хакимовым А. Н. и его коллегами предложен метод ЭШС без последующей термической обработки (нормализации). Применительно к низколегированным термически упрочненным сталям показана эффективность регулирования параметров термического цикла сварки путем сокращения времени нагрева $t_{н}$ и повышения скорости охлаждения $w_{о}$. При выполнении сварки регулирование параметров термического цикла осуществляется за счет сопутствующего охлаждения по оптимальной программе. Специальная технологическая оснастка обеспечивает подачу охлаждающей водно-воздушной смеси на сварной шов и ЗТВ соединения с помощью щелевых воздушно-гидравлических форсунок, установленных внутри сварочного аппарата на уровне ванны расплавленного металла. Интенсивный теплоотвод для обеспечения необходимых параметров термического цикла по толщине металла осуществляется с одной поверхности сварного соединения.

Исследования микроструктуры металла сварного соединения показали, что в процессе ЭШС при скорости охлаждения 0,7−1,0 °С/с образуется ферритно-перлитная структура металла шва и ЗТВ, типа видманштеттовой. Наблюдаются значительные выделения феррита по границам первичных зерен аустенита. Размер зерна соответствует баллу 0−1. Содержание феррита в структуре металла шва составляет около 60 %, а в структуре металла ЗТВ — 40 %. При скорости охлаждения 6−8 °С/с длительность пребывания выше температуры критической точки Ас3 сокращается от 140 до 40−45 с. Это способствует уменьшению содержания феррита в структуре сварного соединения и повышению механических свойств.

[2] Полетаев В. Ю. Повышение трещиностойкости при отпуске сварных соединений толстолистовой стали 15Х2НМФА-ВРВ на основе разработки технологии однопроходной автоматической дуговой сварки : дисс. … канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2017. 162 с.

Все вышеперечисленные способы сварки полностью не решают основную проблему перегрева и снижения технологической прочности толстолистовых сварных соединений при ЭШС. Одним из способов, уменьшающих тепловложение, и, как следствие, размер зерна и протяженность зоны термического влияния, является способ однопроходной электродуговой сварки в щелевую разделку с принудительным формированием шва в вертикальном положении (рис. 5). Способ разработан коллективом под руководством Ю. В. Полетаева. Термический цикл сварки регулируется за счет изменения параметров режима электродугового процесса. В этом предложенный способ принципиально отличается от ЭШС.

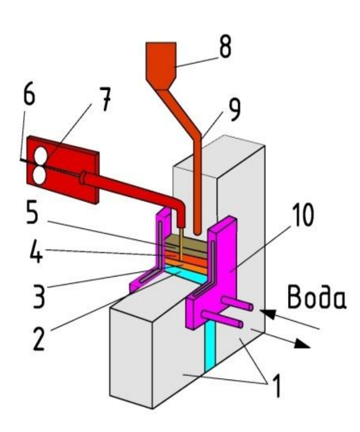
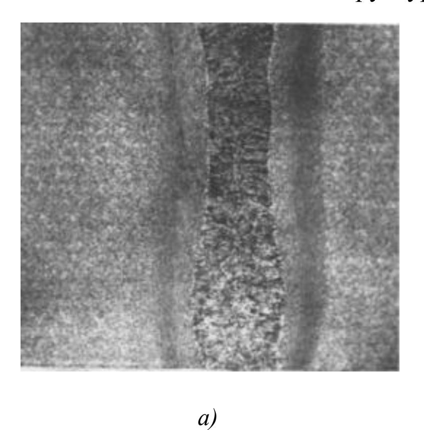
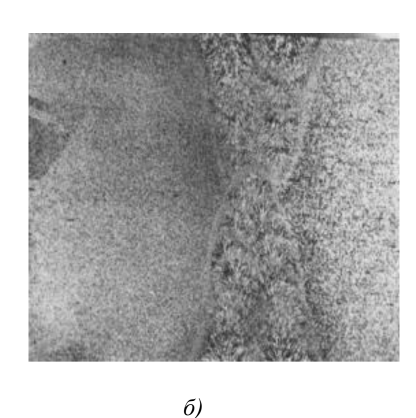
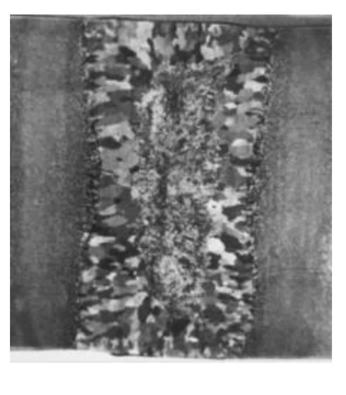


Рис. 5. Принципиальная схема способа сварки: 1 — свариваемые детали; 2 — металл сварного шва; 3 — сварочная ванна; 4 — жидкий шлак; 5 — слой флюса; 6 — сварочная проволока; 7 — механизм подачи проволоки; 8 — дозатор флюса; 9 — подвод флюса в зону сварки; 10 — медный водоохлаждаемый ползун

Дуговой процесс обеспечивает требуемое тепловложение, качественное проплавление свариваемых кромок и «мягкий» термический цикл сварки металла в ЗТВ. Для этого высота слоя жидкого шлака, покрывающего сварочную дугу, поддерживается равной ширине сварочного зазора щелевой резки, которая составляет 14−18 мм. Это полностью исключает разбрызгивание шлака, обеспечивает стабильность процесса и формирование качественного сварного соединения. Высота слоя жидкого шлака контролируется и поддерживается с помощью автоматического устройства управления подачей флюса. Оптимальный сварочный зазор зависит от толщины и длины свариваемых деталей и устанавливается экспериментально с учетом возможности сварки и качественного оплавления кромок. Для сварки листов большой толщины в зазор одновременно подают две или более электродных проволок малого диаметра (2 мм), расположенных одна за другой вдоль оси резания. Подача проволоки малого диаметра в узкий зазор обеспечивает высокую скорость сварки — до 5 м/ч, в то время как при традиционном способе ЭШС эта скорость составляет не более 0,9−1,0 м/ч. Предлагаемый способ повышает скорость кристаллизации металла шва, что способствует формированию мелкозернистой структуры и требуемого уровня механических свойств соединения (рис. 6). Установлено, что у сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей, выполненных электродуговой сваркой в щелевую разделку с погонной энергией $Q_{св}$ до 15 МДж/м, формируется благоприятная макро- и микроструктура без крупных столбчатых кристаллов с минимальной протяженностью участка перегретых крупных зерен у зоны сплавления (не более 1 мм). Качество и механические свойства таких структур удовлетворяют нормативным требованиям.







а) *б)* *в)*

Рис. 6. Макростроение сварного соединения, выполненного способом: *а* — сварки в щелевую разделку; *б* — автоматической сварки под флюсом; *в* — ЭШС, ×100

В ходе экспериментального исследования установлены следующие достоинства способа электродуговой сварки в щелевую разделку:

— сварные соединения подвергаются только высокому отпуску;

— высокая скорость сварки (до 5 м/ч);

— технологичность и высокое качество соединений;

— минимальные угловые деформации при сварке;

— отсутствие механической обработки кромок под сварку;

— сварка выполняется без предварительного и сопутствующего нагрева;

— низкий расход флюса;

— образование соединений с высокой стойкостью против образования межкристаллитного разрушения при сварке и термообработке (отпуске);

— низкие затраты на термообработку и последующую механическую обработку соединений от накипи.

Обсуждение и заключения:

1. Изучены прогрессивные способы и технологии электрошлаковой сварки с регулируемым термическим циклом. Показано, что, оптимизируя тепловложение (параметры термического цикла) при сварке, можно управлять структурной, механической однородностью сварного соединения и его технологической прочностью.

2. Показано, что реализация способов ЭШС с регулируемым термическим циклом сопряжена с усложнением технологии и оборудования.

3. Однопроходная электродуговая сварка в щелевую разделку позволит отказаться от технологии многопроходной автоматической сварки под флюсом и однопроходной ЭШС, заметно увеличивающей технологическую себестоимость изготовления сварной конструкции.

4. Перспективы дальнейшего исследования в данном направлении связаны с разработкой конкурентоспособных, альтернативных способов ЭШС, однопроходной электродуговой сварки в щелевую разделку толстостенных конструкций энергетического машиностроения, обеспечивающих заметное снижение погонной энергии при формировании соединений.

Библиографический список

1. Полетаев, Ю. В. Сварка теплоустойчивых сталей большой толщины / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев. — Ростов-на-Дону : Изд-во Дон. гос. тех. ун-та, 2017. — 167 с.

2. Макаров, Э. Л. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин. — Москва : Изд-во Мос. гос. тех. ун-та. им. Н. Э. Баумана, 2014. — 487 с.

3. Полетаев, Ю. В. Влияние способа выплавки стали Cr-Ni-Mo-V на склонность к межзеренному разрушению при электрошлаковом переплаве / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев // Технология машиностроения. — 2016. — № 8. — С. 5–10.

4. Полетаев, Ю. В. Влияние термического цикла сварки и повторного нагрева на структурно-фазовые изменения низколегированной стали Cr-Ni-Mo-V / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016. — Т. 16, № 4 — С. 96–103.

5. Зубченко, А. С. Исследование влияния повторного нагрева на упрочнение и растрескивание сварных соединений перлитных сталей / А. С. Зубченко, А. В. Федоров, Е. А. Суслова // Сварка и диагностика. — 2009. — № 4. — С. 2–5.

6. Зубченко, А. С. Исследование причин растрескивания сварных соединений толстостенных сосудов давления при последующей термической обработке / А. С. Зубченко, А. В. Федоров, Ю. В. Нечаев // Сварка и диагностика. — 2009. — № 2. — С. 21–25.

7. Krishna, K. Narrow-gap improved electroslag welding for bridges / K. Krishna // Welding in the World. — 1996 — Vol. 38, no. 11. — P. 325−335. FHWA Memorandum: Narrow-gap electroslag welding for bridges. — March 20, 2000. — P. 76−83.

8. Земзин, В. Н. Термическая обработка и свойства сварных соединений / В. Н. Земзин, Р. З. Шрон. — Ленинград : Машиностроение, 1978. — 367 с.

9. Потапов, Н. Н. Особенности металлургических процессов при ЭШС конструкционных сталей с использованием флюсов пониженной основности / Н. Н. Потапов, А. И. Рымкевич, М. Б. Рощин // Сварочное производство. — 2011. — № 1. — С. 27–32.

10. Рымкевич, А. И. Влияние химической активности флюса на свойства наплавленного металла при электрошлаковой сварке и электрошлаковом переплаве / А. И. Рымкевич, Н. Н. Потапов, М. Б. Рощин // Сварочное производство. — 2011. — № 3. — С. 3–8.

Сдана в редакцию 27.07.2020
Принята к публикации 02.09.2020

Об авторах:

Полетаев Юрий Вениаминович, профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5465-1886, anclav51@mail.ru

Полетаев Валерий Юрьевич, генеральный директор ООО «Авалон Видео» (347380, РФ, Ростовская область, г. Волгодонск, просп. Курчатова, 14, 70), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3677-7500, afshor@mail.ru

Грицына Александр Николаевич, доцент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9936-7712, svarka.dstu@mail.ru

Агулиев Руслан Бахтиёрович, инженер кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7092-495X , rus.aguliev@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ю. В. Полетаев — научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи, определение методологии исследования, постановка задачи. В. Ю. Полетаев — организация и проведение экспериментального исследования. А. Н. Грицына — сбор и анализ литературных данных, участие в исследованиях, критический анализ, редактирование. Р. Б. Агулиев — литературный и патентный анализ, участие в теоретическом исследовании, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.75:004.942 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-259-268

Физико-математическое моделирование особенностей формирования угловых швов мостовых металлоконструкций при дуговой сварке под флюсом



А. А. Мосин[1], В. А. Ерофеев[2], М. А. Шолохов[3]
[1]ЗАО «Курганстальмост» (г. Курган, Российская Федерация)
[2] ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (г. Тула, Российская Федерация)
[3]ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Российская Федерация)

Введение. Исследовано формирование швов мостовых металлоконструкций при дуговой сварке под флюсом. Цель работы — изучить возможности увеличения производительности процесса дуговой сварки угловых швов.
Материалы и методы. Для оптимизации технологии задействованы методы компьютерного анализа. С их помощью разработана физико-математическая модель формообразования угловых швов при сварке под флюсом. Она основана на системе уравнений теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны. В данной системе формирование дуговой каверны определено по изотерме кипения флюса под действием излучения столба дуги, учтены теплоперенос парами флюса внутри дуговой каверны и влияние пространственного положения на формирование сварочной ванны.
Результаты исследования. Предложены новые математические зависимости, описывающие физические явления при дуговой сварке угловых швов под флюсом. Основная особенность предложенной модели — учет принципиального отличия дуговой сварки под флюсом от дуговой сварки в защитном газе, а именно: при сварке под флюсом дуга горит в парогазовой полости, возникающей при плавлении и испарении флюса. Проведено численное моделирование распределения температур при сварке под флюсом «в лодочку» и «в угол». Выявлены ограничения процесса при сварке угловых швов за один проход. Установлено, что сварка под флюсом «в лодочку» в один проход обеспечивает качественное формирование швов практически для любой толщины листов металла. При сварке «в угол» качественное формирование обеспечивается только для толщины до 8 мм. При больших толщинах формирование шва нарушается из-за стекания расплава с вертикальной стенки. В этом случае катет углового шва уменьшится, образуется характерный подрез, поэтому сварной шов будет асимметричным и менее прочным.
Обсуждение и заключение. Сравнение результатов численного анализа с фактическими данными о режимах сварки при производстве мостовых металлоконструкций показало, что существующие технологии сварки угловых швов уже достигли своей максимальной производительности. Далее повышать производительность за счет формирования катетов увеличенного размера можно только при многодуговых или многоэлектродных способах сварки.

Ключевые слова: угловой шов, сварка под флюсом, физико-математическая модель, численное моделирование, дуговая каверна.

Для цитирования: Мосин, А. А. Физико-математическое моделирование особенностей формирования угловых швов мостовых металлоконструкций при дуговой сварке под флюсом / А. А. Мосин, В. А. Ерофеев, М. А. Шолохов // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 259−268. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-259-268



Physicomathematical modeling of the formation features of fillet welds of bridge metal structures under submerged-arc welding

A. A. Mosin[1], V. A. Erofeev[2], M. A. Sholokhov[3]
[1] "Kurganstalmost" CJSC (Kurgan, Russian Federation)
[2] Tula State University (Tula, Russian Federation)
[3] Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russian Federation)

Introduction. The weld formation under the submerged-arc welding of bridge metal structures is investigated. The work objective is to study possibilities to increase the welding performance during the arc welding of fillet seams.
Materials and Methods. Methods of computer analysis are used to optimize the technology. With their help, a physicomathematical model of fillet weld formation under the submerged-arc welding has been developed. It is based on a system of equations for thermal conductivity and equilibrium of the weld pool surface. In this system, the formation of an arc cavern is determined through the flux boiling isotherm under the action of the arc column radiation; heat transfer by the flux vapor inside the arc cavern and the influence of the spatial position on the formation of the weld pool are taken into account.
Results. New mathematical relationships that describe physical phenomena under the submerged-arc welding of fillet welds are proposed. The key feature of the proposed model is in the fundamental difference between the submerged-arc welding and the gas-shielded arc welding, i.e., during submerged-arc welding, the arc burns in a gas-vapor cavern that appears due to the melting and evaporation of flux. Numerical simulation of the temperature distribution during production of the fillet welds in 1F and 2F positions is carried out. The process constraints under the single-run welding of the fillet welds are specified. It was determined that the single-run submerged-arc welding of fillet welds in 1F position exhibits high-quality formation of welds for almost the entire range of metal sheet thicknesses. During production of fillet welds in 2F position, high-quality formation is provided only for sheet thicknesses up to 8 mm. At heavy thicknesses, the formation of the seam is disrupted due to the melt flow from the vertical wall. In this case, the leg length decreases; a typical undercut is formed; so the weld will be asymmetric and less strong.
Discussion and Conclusions. Comparison of the numerical analysis results with actual data on welding modes under the production of bridge metal structures shows that the existing fillet welding technologies have already reached their maximum efficiency rate. Further productivity gain is possible by forming oversized legs only with multiarc or multielectrode welding methods.

Keywords: fillet weld, submerged-arc welding, physicomathematical model, numerical simulation, arc cavern.

For citation: A.A. Mosin, V.A. Erofeev, M.A. Sholokhov. Physicomathematical modeling of the formation features of fillet welds of bridge metal structures under submerged arc welding. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 259−268. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-259-268

Введение. Традиционные методы строительства мостов предусматривают укрупненную сборку объемных сварных металлоконструкций на месте строительства [1]. Поэтому на самом объекте сварочные работы проводятся по минимуму. Они выполняются, в основном, на заводах мостовых металлических конструкций [2], и бóльшая их часть связана со сваркой протяженных швов. Из них на угловые приходится от 40 % до 70 %. Угловые швы при малой толщине свариваются без разделки кромок. При толщинах до 50 мм применяются асимметричная и симметричная разделки с углом раскрытия 45–60°. Оптимальны угловые швы с плоской поверхностью в поперечном сечении и плавными переходами к основному металлу по зонам сплавления без наплывов и подрезов, газовых полостей и шлаковых включений. Помимо этого сварные соединения должны обладать высокой пластичностью и ударной вязкостью при низких температурах. Недопустимы дефекты формирования швов. Бездефектное воспроизведение максимально возможного катета при сварке угловых швов является основным резервом повышения производительности [3].

Для минимизации дефектов и повышения производительности процессов сварки мостовых металлоконструкций угловые швы с максимально возможным размером катета желательно сваривать в один проход. Поэтому актуальной задачей является увеличение катета, свариваемого за один проход [4]. Этого можно достичь:
— оптимизацией параметров процессов сварки,
— использованием новых источников нагрева,
— сокращением вспомогательного времени,
— повышением легкоплавкости электродной проволоки.

В первую очередь следует рассмотреть возможность бездефектного воспроизведения в заводских условиях максимально возможного катета при использовании традиционной технологии сварки под флюсом

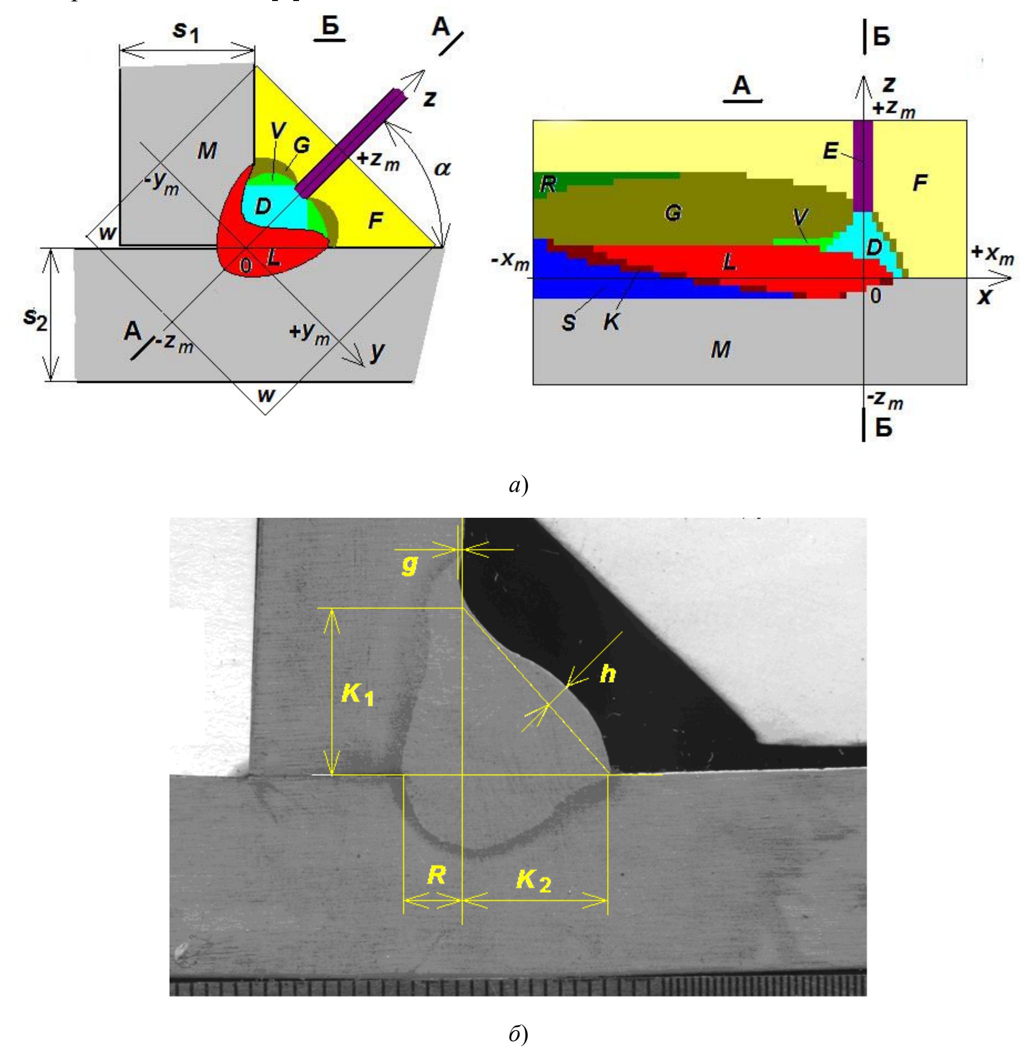
плавящимся электродом.

Цель настоящей работы — изучение возможностей увеличения производительности процесса дуговой сварки угловых швов с учетом особенностей их формирования.

Материалы и методы. Как отмечается в [5], помимо общеизвестных параметров режима сварки (ток дуги, скорость сварки) на производительность процесса сварки под флюсом влияют напряжение дуги и диаметр электродной проволоки. Пространственное положение при сварке и позиционирование электрода в разделке также существенно влияют на формирование угловых швов [6]. Рассмотреть влияние всей совокупности перечисленных факторов на производительность процесса сварки и качество угловых швов без использования современных методов исследования — крайне трудоемкая задача.

Для существенного сокращения объема экспериментальных исследований сварки угловых швов применяют физико-математическое моделирование напряжений и особенностей формообразования и провара [7–9]. Рассмотрим последовательность компьютерного моделирования особенностей формирования угловых швов — от создания модели до ее визуализации. Основное отличие способа дуговой сварки под флюсом от дуговой сварки в защитном газе состоит в том, что дуга горит в парогазовой полости, возникающей из-за плавления и испарения флюса. Вторая важная особенность: физические явления, определяющие формирование сварочной ванны и шва, протекают в разных средах [9]. Это следует учесть в физико-математической модели формирования шва при сварке под флюсом.

Координаты пространства моделирования. При моделировании обозначают пространство, в котором происходит сварка угловых швов, и геометрические размеры качественных швов. На рис. 1 *а* выделена область пространства, охватывающая свариваемые кромки и зоны горения дуги, плавления флюса и металла, а на рис. 1 *б* — геометрические размеры угловых швов, по которым можно оценить качество их формирования в соответствии с рекомендациями [5].



а)

б)

Рис. 1. Строение пространства моделирования процесса сварки (*а*) и геометрические размеры угловых швов (*б*), определяющие качество их формирования

Пространство моделирования включает зоны: M — исходный металл, E — электрод, D — сварочная дуга, F — сыпучий флюс, V — пар флюса, G — расплавленный флюс, R — затвердевший флюс, L — жидкий металл, K — твердожидкий металл, S — металл шва, W — воздух. Внутренние межзонные поверхности обозначены как пересечения множеств точек, принадлежащих соответствующим зонам. Например, поверхность сварочной ванны $Z_L(x, y)$ обозначена $L\cap(D\cup V\cup G)$. Она отделяет сварочную ванну L от сварочной дуги D, парообразного V и жидкого G флюса. Размеры зон V, G, L, K и расположение поверхностей раздела между ними неизвестны. Их необходимо определить при моделировании. Эти показатели зависят от результатов решения системы уравнений, описывающих физические явления сварки под флюсом. Такую задачу удобнее решать в неподвижной Декартовой системе координат, в которой металл свариваемого стыка неподвижен, а электрод и дуга перемещаются со скоростью сварки v_w по направлению координаты x. Соответственно, координаты оси электрода x_f и y_f определяются:

$$H_{i,j,k}(t)=H_{i+1,j,k}(t-\tau), \tag{1}$$

где t — время с момента возбуждения.

При сварке поверхности углового шва и раздела зон ориентированы преимущественно в плоскости, соединяющей катеты углового шва. Такие поверхности удобно описывать как отклонение от этой плоскости. Поэтому координата z направлена по биссектрисе α угла между листами (или угла разделки кромок).

Теплоперенос является общим процессом для всех выделенных зон. При моделировании рассматривается термодинамическое состояние сред с разными теплофизическими свойствами, в которых действуют несколько внутренних объемно распределенных источников теплоты. Скорость изменения и распределение энтальпии следует описывать уравнением [10]:

$$\frac{\partial H}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q\,(x, y, z, t). \tag{2}$$

Здесь $H = H(x, y, z, t)$ — объемная энтальпия, Дж/см^3; $\lambda = \lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности, зависящий от температуры и материала среды, Вт/(см·°С); q — объемный источник теплоты. Температура $T(x, y, z, t)$ связана с энтальпией $H(x, y, z, t)$ нелинейной функцией $T(H)$, учитывающей зависимость теплоемкости от температуры и теплоты фазовых и агрегатных превращений. В начальный момент времени сварочная ванна отсутствует, флюс находится в сыпучем состоянии, температура во всех точках пространства одинакова и равна температуре окружающей среды. С учетом этого теплообмен зоны моделирования с внешним пространством можно описать граничными условиями:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=0,\ x=\pm x_m, \tag{3}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0,\ y=\pm y_m, \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=0,\ z=\pm z_m. \tag{5}$$

Источники теплоты. Основные источники теплоты: электрическая дуга q_{arc}, действующая в зоне D, и теплота, выделяемая при вылете электрода [11, 12]. Тепловыделение в жидком флюсе практически отсутствует, так как он не имеет прямого контакта с электродом, температура которого меньше температуры плавления флюса, а электрическое сопротивление порошкового флюса очень велико. С учетом этих обстоятельств скорость нагревания металла в вылете электрода (в зоне E) можно описать соотношением:

$$\frac{\mathrm{d}T_f}{\mathrm{d}z}=\frac{\rho_e j^2}{c\rho_f}\frac{z_m-z}{v_f}, \tag{6}$$

где T_f — температура вылета; $\rho_e = \rho_e(T_f)$ — удельное электрическое сопротивление; $j=\frac{4I}{\pi d_f^2}$ — плотность тока I в электроде диаметром d_f; $c\rho_f$ — объемная теплоемкость материала электрода; v_f — скорость подачи электродной проволоки.

Тепловыделение в анодной области дуги на поверхности $E\cap D$ описано как тепловой поток:

$$\frac{dq}{dz}=jU_a, \tag{7}$$

где U_a — падение напряжения в анодной области дуги.

Тепловыделение в плазменном факеле дуги учтено как распределение излучения столба дуги по поверхности дуговой каверны $L\cap(D\cup V)$:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0,\ y=\pm y_{n'}. \tag{8}$$

Тепловой поток, создаваемый тепловыделением в катодной области дуги на поверхности $L\cap D$, равен:

$$\frac{dq}{dn}=\frac{IU_k}{\pi R^2}\exp\left(\frac{-r_0^2}{R^2}\right), \tag{9}$$

где U_k — катодное напряжение дуги, R — эффективный радиус дуги, r_0 — расстояние между точкой поверхности $L\cap D$ и точкой пересечения оси дуги с этой поверхностью.

Теплоперенос каплями электродного металла учитывается тепловым потоком через поверхность $L\cap D$ [13]:

$$\frac{dq}{dn} = \frac{IT_k}{\pi R^2} \exp\left(\frac{-r_0^2}{R^2}\right), \quad (10)$$

где T_k — температура капель, принятая равной полусумме температур плавления и кипения материала электрода.

Теплопередача парами флюса описана как тепловой поток через поверхность сварочной ванны $L \cap V$ и флюса $G \cap V$: $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, z = \pm z_m$. Коэффициент теплопередачи определяется из баланса мощностей испарения и конденсации пара:

$$\int_{S_Z} \frac{dq}{dn} dS_Z \, \overrightarrow{p\,\text{vap} = \text{var}} 0, \quad (11)$$

где S_z — площадь указанных поверхностей $L \cap V \cup G \cap V$.

Уравнение равновесия поверхности сварочной ванны. Расположение поверхности сварочной ванны $Z(x, y)$, разграничивающей зоны $L \cap (D \cup V \cup G)$, определено решением уравнения равновесия давлений на ней:
— капиллярного p_σ,
— гравитационного p_g,
— потока капель электродного металла p_f,
— гидродинамического давления потока металла сварочной ванны p_v,
— электродинамического давления дуги p_a,
— внутреннего давления жидкого металла p_m.

$$\frac{dT_f}{dz} = \frac{\rho_e j^2}{c\rho_f} \frac{z_m - z}{v_f}. \quad (12)$$

Капиллярное давление определяется кривизной поверхности $Z(x, y)$ и при малых прогибах вычисляется:

$$p_\sigma = -\sigma\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}\right), \quad (13)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения.

Гравитационное давление определяется весом столба вещества над точкой поверхности сварочной ванны:

$$p_g = g(\rho(Z - z_{\max}) + \rho_h Z_h), \quad (14)$$

где g — ускорение свободного падения; ρ, ρ_h — плотности металла и шлака; z_{max} — максимальная высота поверхности сварочной ванны; Z_h — толщина слоя жидкого шлака.

Электродинамическое давление сварочной дуги определяется током дуги:

$$p_a = \frac{k_a I^2}{\pi R_p^2} \exp\left[-\frac{(x_0 + v_w t)^2 + y^2}{R_p^2}\right], \quad (15)$$

где k_a — электродинамический коэффициент, R_p — силовой радиус дуги.

Давление потока капель электродного металла определяется скоростью и массой потока:

$$p_f = \rho \frac{v_f^2}{2} \exp\left[\frac{-(x_0 + v_w t)^2 + y^2}{R_f^2}\right]. \quad (16)$$

Гидродинамическое давление потока металла сварочной ванны определяется темпом изменения площади сечения сварочной ванны S_L:

$$p_v = -\rho v_x^2 \frac{dS_L}{dx}. \quad (17)$$

Эта составляющая увеличивает давление перед дугой и уменьшает позади дуги.

Внутреннее давление в расплаве p_m определяется из равенства площади наплавленного металла количеству израсходованного металла электрода:

$$S_{S \cup M}(-x_m) - S_M(+x_m) \overrightarrow{p_m = var} \pi r_f \frac{v_f}{v_w}, \quad (18)$$

где $S_{S \cup M}(-x_m)$ — площадь поперечного сечения металла в конце области моделирования при $x = -x_m$; $S_M(x)$ — начальная площадь поперечного сечения разделки кромок при $x = x_m$.

Ток и расположение сварочной дуги. Ток сварочной дуги I задается скоростью подачи v_f и диаметром d_f электрода:

$$I = v_f \frac{\pi d_f^2}{4} \left(c\rho_f (T_k - T_f) + H_{LS}\right), \quad (19)$$

где T_k — температура капель электродного металла; H_{LS} — объемная удельная теплота плавления.

Длина l сварочной дуги задается напряжением U_0 источника питания и зависит от электрического сопротивления токоведущих элементов R_0 и вылета электрода R_f:

$$l = 1/E\,(U_0 - U_a - U_k - I\,(R_0 + R_f)). \quad (20)$$

Длина дуги определяется градиентом потенциала E в столбе дуги, значение которого зависит от свойств пара флюса. При криволинейной поверхности $L \cap D$ катодного пятна понятие длины дуги нуждается в уточнении. Если рассматривать столб дуги как множество параллельных проводников, то плотность тока будет тем больше, чем меньше расстояние от конца электрода до точки поверхности металла. Среднюю длину l множества таких проводников можно определить решением уравнения:

$$\sqrt{\frac{1}{S} \int_0^S \frac{1}{r^2} dS} = \frac{1}{l}. \quad (21)$$

Здесь r — расстояние от конца электрода до рассматриваемой точки поверхности сварочной ванны; S — площадь сечения столба, определяемая эффективным радиусом R дуги. Последний зависит от тока I дуги [13]:

$$R=\sqrt{\frac{I}{\pi j}+R_f^2},$$

где j — плотность тока в дуге в парах флюса.

Электрическое сопротивление вылета зависит от его длины L_f и температуры T_f, распределенной по длине:

$$R_f=\frac{4}{\pi d_f^2}\int_0^{L_f}\rho_e\big(T_f(z)\,dz\big). \qquad (22)$$

Алгоритм численного решения системы уравнений физико-математической модели. Изначально неизвестно геометрическое строение зоны формирования сварочной ванны. Это требует непрерывной корректировки расположения межзонных поверхностей в зависимости от результатов решения уравнений теплопроводности и равновесия сварочной ванны. Расположение поверхностей, разграничивающих твердое, жидкое и газообразное состояние флюса и металла, уточняется по положению соответствующих изотерм в результате решения уравнения теплопроводности. Для корректировки расположения поверхности сварочной ванны решается уравнение равновесия давлений на данной поверхности $Z(x, y)$. В этом случае необходимо изменить размеры зон L, V, G, D. Принимается, что температуры металла и шлака в зоне перемещения равны температуре поверхности на момент выполнения решения, а их энтальпии изменяются в соответствии с этой температурой. При трансформации возникают погрешности, которые определяются как скорости изменения энтальпии при изменении объемов v_L, v_G зон L и G:

$$\Lambda_L=\frac{d}{dt}\Big(\int_{v_L}H dv_L\Big) \text{ и } \Lambda_G=\frac{d}{dt}\Big(\int_{v_G}H dv_G\Big). \qquad (23)$$

Эти погрешности компенсируются изменением энтальпии зон L и G в зависимости от распределения в них температуры:

$$\frac{d}{dt}H\big((x,y,z)\in L\big)=\Lambda_L\frac{T(x,y,z)-T_L}{\frac{1}{v_L}\int_{v_L}(T(x,y,z)-T_L)\,dv_L}, \qquad (24)$$

где T_L — температура ликвидуса.

По мере приближения термодинамического состояния к установившемуся состоянию погрешность трансформации $\Lambda_L \to 0$. Условием окончания моделирования является стабилизация длины изотермы солидуса:

$$\frac{d}{dt}(\max x\in S)\to 0. \qquad (25)$$

Система уравнений модели решается распределением температуры $T(x, y, z, t)$ и геометрического строения зоны моделирования. Это позволяет воспроизвести начальную стадию процесса с момента возбуждения дуги до достижения установившихся размеров сварочной ванны. Для решения уравнений теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны использован метод конечных разностей на сопряженных сетках. На межфазных поверхностях коэффициент теплопроводности определяли как среднегармоническое значение теплопроводности соседних фаз.

Ниже схематично представлен алгоритм численного моделирования процесса сварки.

Исходные данные: геометрия разделки кромок после выполнения предшествующего прохода, теплофизические свойства стали и флюса, параметры сварки
Определение начальной геометрии области численного решения Расчет параметров плавления электродной проволоки и энергетических характеристик сварочной дуги
Цикл нестационарного численного моделирования термодинамического состояния области формирования сварочной ванны — Определение распределения тепловых потоков по поверхностям металла и шлака — Решение уравнения теплопроводности — Решение вариационной задачи о расположении сварочной дуги в разделке кромок —— Решение уравнения равновесия поверхности сварочной ванны при воздействии капиллярного, гравитационного, электродинамического, гидродинамического и внутреннего давлений —— Расчет внутреннего давления сварочной ванны по условию баланса масс шва и подачи электрода — до равенства масс наплавки и подачи электрода — Корректировка расположения межфазовых границ «пар — шлак — сыпучий флюс — твердый шлак», «твердый — жидкий металл» по решениям уравнения теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны до стабилизации длины изотермы температуры солидуса
Формирование протокола результатов моделирования по распределению температур, геометрии области формирования сварочной ванны, энергетических характеристик процесса сварки

Рис. 2. Алгоритм численного моделирования формирования шва при дуговой сварке под флюсом

Результаты исследования. Для виртуального исследования взяли сведения о теплофизических свойствах сталей из [13]. Кроме того, использовали данные группы компаний «Трансстрой» о конкретных применяемых марках сталей и технологических материалах, режимах сварки под флюсом угловых швов мостовых металлоконструкций[1].

Виртуальное воспроизведение процесса сварки «в лодочку». Для проверки разработанной модели выполнили компьютерное моделирование процесса сварки таврового соединения Т1 листов из стали 15ХСНД толщиной 12 мм. Режим сварки выбрали в соответствии с рекомендациями [14]: проволока Св08ГА диаметром 5 мм, напряжение дуги — 34 В, скорость сварки — 18 м/час (5 мм/с), вылет электрода — 25 мм. Скорость подачи электрода, рассчитанная в модели, — 10 мм/с, что соответствует данным работы [14], рекомендующей эти значения в диапазоне 55–61 м/час.

На рис. 3 представлены результаты моделирования процесса сварки при наклоне листов 45° (в «лодочку»).

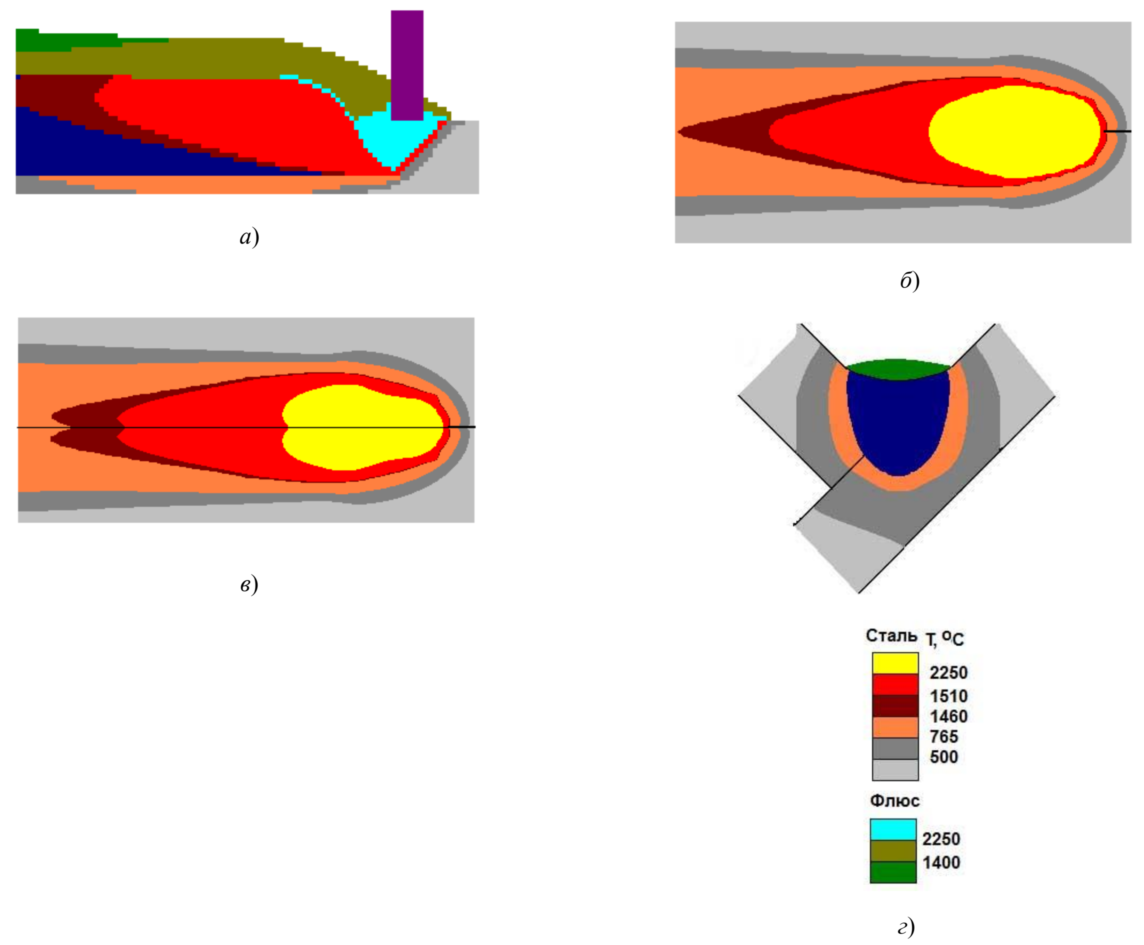


Рис. 3. Распределение температуры при моделировании процесса сварки углового шва под флюсом при наклоне листов 45° (в «лодочку»): *а* — продольное сечение сварочной ванны в плоскости симметрии стыка ; *б* — поверхность металла под флюсом; *в* — поверхность свариваемых листов; *г* — расчетный профиль поперечного сечения шва

В результате получены значения: длина дуги — 6,8 мм; эффективное падение анодного напряжения — 5,9 В, катодного — 8,5 В; градиент потенциала в столбе дуги — 4,4 В/мм; диаметр столба дуги — 18 мм. Общая мощность процесса — 23 кВт, из нее на излучение приходится 12,9 кВт. Дуга выделяет на электроде 4,3 кВт; на поверхности стыка — 5,8 кВт. Мощность тепловыделения в вылете электрода — 0,2 кВт; температура его нагрева током дуги — 152 °С. Площадь плана дуговой каверны — 135 мм^2; объем каверны — 519 мм^3. Глубина кратера под дугой — 16 мм. Длина сварочной ванны на поверхности по ликвидусу — 38 мм, по солидусу — 52 мм. Масса сварочной ванны — 150 г. Ширина шва — 15 мм; катет — 10,7 мм; глубина проплавления стыка — 6 мм; площадь поперечного сечения — 158 мм^2. Шов формируется с мениском до 1,3 мм.

Виртуальное воспроизведение процесса сварки «в угол». При сварке конструкций большого размера невозможно использовать кантователи. В этом случае выполняется сварка «в угол». Результат моделирования формирования шва при таком положении и тех же условиях показан на рис. 4.

[1] СТО-ГК «Трансстрой»-012-2007. Стальные конструкции мостов. Заводское изготовление / Трансстрой. М., 2007. 174 с.

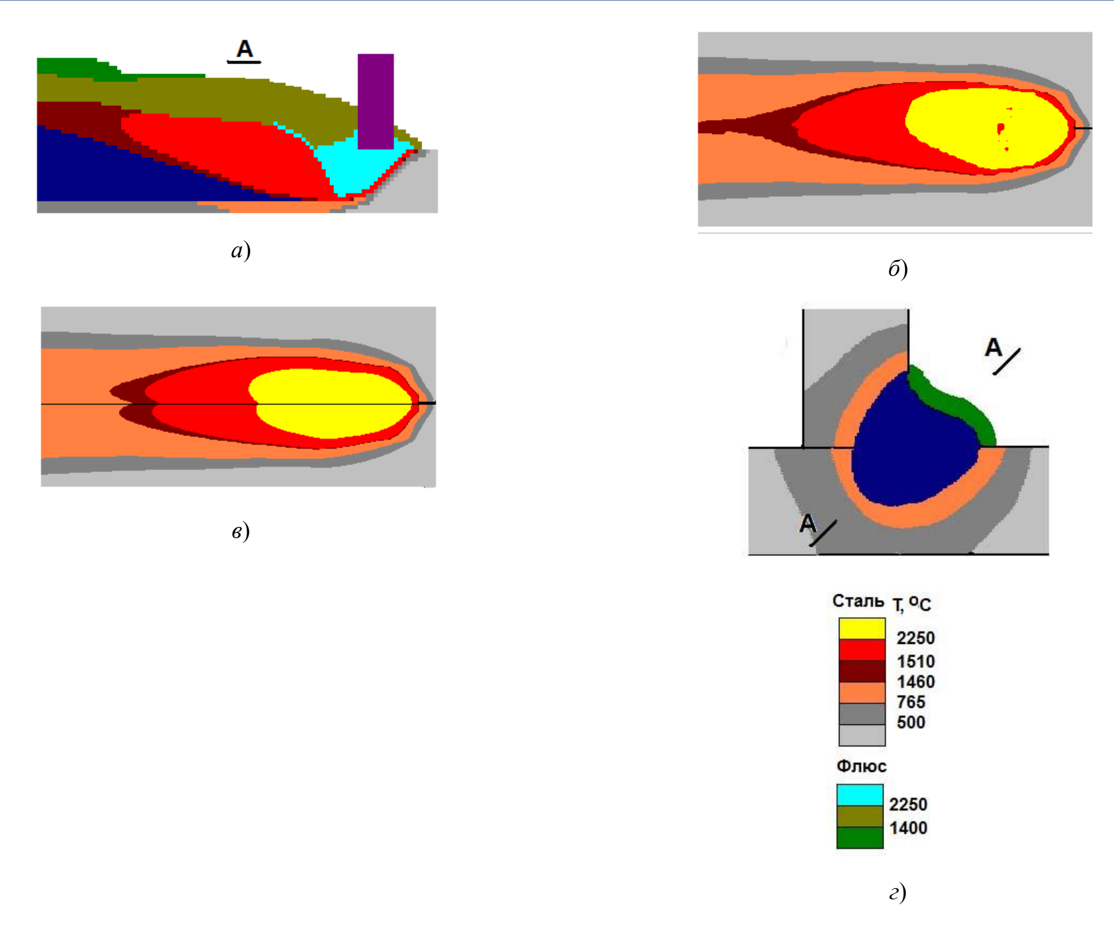


Рис. 4. Результат компьютерного моделирования формирования углового шва при сварке «в угол» с приваркой вертикальной стенки к горизонтальному основанию: *а* — продольное сечение сварочной ванны в плоскости симметрии стыка; *б* — поверхность металла под флюсом; *в* — поверхность свариваемых листов; *г* — расчетный профиль поперечного сечения шва

Заметное стекание расплава со стенки стыка на полку при сварке «в угол» обусловлено большой массой сварочной ванны. Отклонение поверхности шва от плоскости, соединяющей стенки, — ±1,5 мм. Расплав стекает с вертикальной стенки на горизонтальное основание, поэтому сварной шов получается асимметричным, а расплав в верхней части шва уменьшается на 2 мм.

Максимально возможный размер катета. Необходимо выяснить, при каком максимальном размере катета (сварка «в лодочку» и «в угол») формируется качественный шов. С этой целью выполнили моделирование сварки углового шва листов толщиной 8 мм проволокой диаметром 2 мм при токе дуги 350 А. Варьировали скорость сварки и напряжение дуги. Результаты представлены на рис. 5.

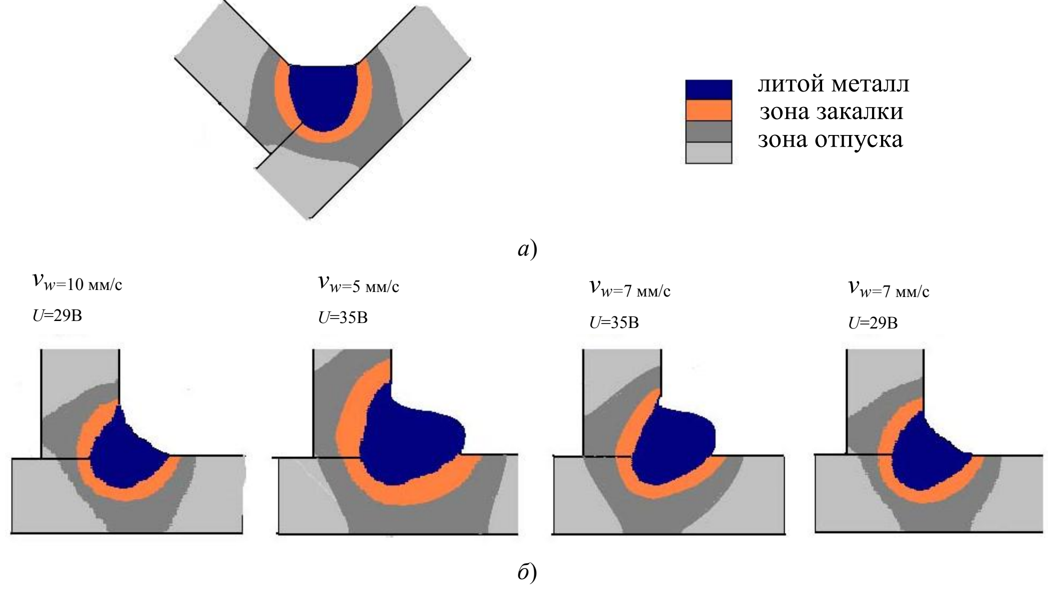


Рис. 5. Результат компьютерного моделирования формирования шва: *а* — «в лодочку», *б* — «в угол»

Если соблюдать рекомендуемую в работе скорость сварки «в лодочку» (рис. 5 *а*), формируется шов с равными катетами 6 мм. Это меньше требуемого, но без наплыва и мениска. При сварке «в угол» на том же режиме (рис. 5 *б*) формируется шов с мениском. Для увеличения катета выполнили моделирование при меньшей скорости сварки и большем значении напряжения дуги. При скорости 5 мм/с и напряжении 35 В площадь сечения литой зоны и ее размеры существенно увеличиваются, но формируется шов с подрезом и натеком. Увеличение скорости сварки до 7 мм/с уменьшает натек. Если снизить напряжение, приемлемый шов формируется при катетах около 7 мм.

Эти результаты показывают, что рекомендуемые режимы сварки под флюсом являются наиболее производительными для получения катетов заданных размеров. Для получения катетов большего размера при однодуговой сварке необходимы дополнительные проходы. Однако общая производительность сварки в этом случае значительно снижается.

Обсуждение и заключение. Трудоемкость изготовления элементов мостовых конструкций в значительной мере определяется трудоемкостью сварки. Рациональным способом повышения производительности является использование автоматической сварки под флюсом. Для оптимизации технологии методами компьютерного анализа разработана физико-математическая модель формообразования угловых швов при сварке под флюсом. Основа модели — система уравнений теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны. В данной системе формирование дуговой каверны определено по изотерме кипения флюса под действием излучения столба дуги. Учтены теплоперенос парами флюса внутри дуговой каверны и влияние пространственного положения на формирование сварочной ванны. Численно решены уравнения модели сварки под флюсом углового соединения при толщине металла, типичной для мостовых конструкций. Решение показало, что при выполнении сварки «в лодочку» соединение формируется в один проход. По данным моделирования, при сварке углового шва «в угол» возможно неудовлетворительное формирование из-за стекания жидкого металла с вертикальной стенки. В этом случае для получения качественного шва необходимы дополнительные подварочные проходы.

Исследования показали, что традиционная технология однодуговой сварки под флюсом угловых швов с формированием катетов увеличенного размера уже достигла своей максимальной производительности. Для дальнейшего ее повышения необходимо использовать более сложные специальные приемы. Среди таких нетрадиционных технологий:

— многодуговые и многоэлектродные способы сварки [14, 15],

— введение в сварочную ванну нетоковедущей (холодной) присадочной проволоки [16], гранулированной металлической присадки (крупки) или металлического порошка [17].

Библиографический список

1. Курлянд, В. Г. Строительство мостов : учеб. пособ. для вузов / В. Г. Курлянд, В. В. Курлянд. — Москва : МАДИ, 2012. — 176 с.

2. Полосков, С. С. Организационно-управленческий механизм управления инновационным потенциалом высокотехнологичных наукоемких предприятий / С. С. Полосков, А. В. Желтенков // Экономика и предпринимательство. — 2019. — № 2 (103). — С. 1051–1057.

3. Вотинова, Е. Б. Основы технологической подготовки производства / Е. Б. Вотинова, М. П. Шалимов, А. М. Фивейский. — Екатеринбург : УрФУ, 2017. — 168 с.

4. Мосин, А. А. Возможности повышения производительности сварки протяженных угловых швов мостовых металлоконструкций / А. А. Мосин // Сварка и диагностика. — 2020. — № 1. — С. 50–54.

5. Исследование влияния режимов сварки под слоем флюса на форму и проплавление угловых швов / А. О. Артемов, В. В. Каратыш, В. М. Язовских [и др.] // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. — 2010. — Т. 12, № 5. — С. 130–142.

6. Томас, К. И. Технология сварочного производства / К. И. Томас, Д. П. Ильященко. — Томск : Изд-во ТПУ. — 2011. — 247 с.

7. Shen, J. Welding simulation of fillet-welded joint using shell elements with section integration / J. Shen, Z. Chen // Journal of Materials Processing Technology. — 2014. — Vol. 214, no. 11. — P. 2529–2536.

8. Cho D.-W. Analysis of submerged arc welding process by three-dimensional computational fluid dynamics simulations / D.-W. Cho, W.-H. Song, M.-H. Cho [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. — 2013. — Vol. 213, no. 12. — P. 2278–2291.

9. Математическая модель процесса сварки под флюсом и явлений в дуговой каверне / В. А. Судник, В. А. Ерофеев, А. В. Масленников [и др.] // Сварочное производство. — 2012. — № 7. — С. 3–12.

10. Судник, В. А. Математическая модель формирования сварочной ванны при дуговой сварке под флюсом и анализ процесса переноса металла / В. А. Судник, В. А. Ерофеев, А. В. Масленников // Известия

Тульского государственного университета. — 2015. — Вып. 6, ч. 2. — С. 21–31.

11. Ghosh, A. Mathematical modeling of moving heat source shape for submerged arc welding process / A. Ghosh, H. Chattopadhyay // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2013. — Vol. 69. — P. 2691–2701.

12. Лесков, Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. — Москва : Машиностроение, 1970. — 355 с.

13. Тайц, Н. Ю. Технология нагрева стали / Н. Ю. Тайц. — Москва : Металлургиздат, 1962. — 568 с.

14. Инженерная методика расчета параметров режима двухдуговой сварки угловых швов / А. Ю. Мельников, А. М. Фивейский, М. А. Шолохов, А. Е. Филяков // Сварка и диагностика. — 2016. — № 3. — С. 46–48.

15. Kiran, D. V. Arc interaction and molten pool behavior in the three wire submerged arc welding process / D. V. Kiran, D.-W. Cho, W.-H. Song [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2015. — Vol. 87. — P. 327–340.

16. Ribeiro, R. A. Predicting weld bead geometry in the novel CW-GMAW process / R. A. Ribeiro, E. B. F. Santos, P. D. C. Assunção [et al.] // Welding Journal. — 2015. — Vol. 94, no. 9. — P. 301–311.

17. Ивочкин, И. И. Сварка под флюсом с дополнительной присадкой / И. И. Ивочкин, Б. Д. Малышев. — Москва : Стройиздат, 1981. — 176 с.

Сдана в редакцию 30.04.2020
Запланирована в номер 06.07.2020

Об авторах:

Мосин Алексей Александрович, заместитель директора по производству ЗАО «Курганстальмост» (640023, РФ, г. Курган, ул. Загородная, 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5809-5423, Mosinaa@kurganstalmost.ru

Ерофеев Владимир Александрович, профессор кафедры «Сварка, литье и технология конструкционных материалов» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300600, РФ, Тула, пр. Ленина, 92), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3756-2640, Va_erofeev@mail.ru

Шолохов Михаил Александрович, заведующий кафедрой «Автоматизация и роботизация сварочного производства», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620002, РФ, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7666-5645, M.a.sholokhov@urfu.ru

Заявленный вклад соавторов

А. А. Мосин — постановка цели и задач исследования, определение области моделирования и граничных условий, анализ результатов, подготовка текста, формирование выводов. В. А. Ерофеев — построение физико-математической модели, анализ результатов. М. А. Шолохов — научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.793.1(620.18) https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-269-279

Морфология и генеалогия структурных дефектов в вакуумных ионно-плазменных покрытиях



О. В. Кудряков, В. Н. Варавка, И. Ю. Забияка, Э. А. Ядрец, В. П. Караваев
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. В качестве основной цели исследования выбрана систематизация и анализ структурных дефектов вакуумных ионно-плазменных покрытий, на основе которых в работе предложены их классификационные принципы. Ещё одной важной частью работы является экспериментальное изучение одного из специфических дефектов покрытий, который авторами предложено назвать «дефектом субструктурного происхождения».
Материалы и методы. В качестве объекта исследований использованы PVD-покрытия различных нитридных и металлических систем толщиной 1,5–9,0 мкм. Покрытия наносили в вакуумных установках с использованием дуговых и магнетронных испарителей. Результаты исследований получены методами электронной микроскопии высокого разрешения, энергодисперсионного анализа и индентирования.
Результаты исследования. В качестве результатов исследования представлены различные виды дефектов ионно-вакуумных покрытий, к которым отнесены нарушения сплошности, деформация кристаллитов, структурные неоднородности. Обоснованы принципы их систематизации. Предложено классифицировать дефекты на капельные, субструктурные и дефекты роста (в зависимости от причин их зарождения), а также на регулярные и стохастические (в зависимости от их распределения в объеме покрытия). Особое место в работе отведено изучению «субструктурных дефектов», отнесенных авторами к типу стохастических. Эти дефекты микрометрических размеров имеют форму цилиндра с конической «головкой». Их главная ось ориентирована перпендикулярно поверхности покрытия. Они имеют особенность экструдироваться (отторгаться) покрытием. В статье обоснован дислокационный механизм их зарождения и геликоидный принцип роста.
Обсуждение и заключения. Резюмируется вывод о том, что предложенная систематизация дефектов ионно-плазменных покрытий имеет характер промежуточного результата исследований в этом научном направлении. При этом субструктурные дефекты не оказывают фатального влияния на структуру и свойства покрытия в силу малости своих размеров.

Ключевые слова: металлокерамические покрытия, вакуумное ионно-плазменное осаждение, микроструктура, дефекты структуры, растровая электронная микроскопия.

Для цитирования: Морфология и генеалогия структурных дефектов в вакуумных ионно-плазменных покрытиях / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка, И. Ю. Забияка [и др.] // Advanced Engineering Research — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 269–279. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-269-279

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00546)



Morphology and genealogy of structural defects in vacuum ion-plasma coatings

O. V. Kudryakov, V. N. Varavka, I. Yu. Zabiyaka, E. A. Yadrets, V. P. Karavaev
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The main work objective is systematization and analysis of structural defects of vacuum ion-plasma coatings; on this basis, their classification principles are developed and given in the paper. Another important part of the

work is the experimental study on one of the specific defects of coatings, which the authors propose to call “defect of substructural origin”.
Materials and Methods. PVD coatings of various nitride and metal systems 1.5–9.0 μm thick were used as an object of the research. Coatings were applied in vacuum installations using arc and magnetron evaporators. The research results were obtained by high resolution electron microscopy, energy dispersive analysis and indentation.
Results. Various types of defects in ion-vacuum coatings are presented as the research results. They include discontinuities, deformation of crystallites, and structural inhomogeneity. The principles of their systematization are validated. It is proposed to classify defects into droplet, substructural, and growth defects (depending on the causes of their nucleation), as well as regular and stochastic ones (depending on their distribution in the coating volume). The study of “substructural defects”, classified by the authors as stochastic, is given special consideration. These micrometric defects are shaped like a cylinder with a conical “head”. Their main axle is oriented perpendicular to the surface of the coating. They can be “extruded” (tore away) by the coating. The paper validates the dislocation mechanism of their nucleation and the helicoid growth principle.
Conclusions. The inference is summarized that the proposed systematization of defects in ion-plasma coatings has the character of an intermediate result of research in this scientific area. At this, the “substructural defects” do not have a fatal effect on the structure and properties of the coating due to a small size.

Keywords: metal ceramic coatings, vacuum ion-plasma deposition, microstructure, structure defects, scanning electron microscopy.

For citation: O.V. Kudryakov, V.N. Varavka, I.Yu. Zabiyaka, et al. Morphology and genealogy of structural defects in vacuum ion-plasma coatings. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 269−279. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-269-279

Funding information: the research is done with the financial support from RFFI (grant no. 18-08-00546).

Введение и постановка задачи. Получение ионно-плазменных покрытий — одно из наиболее бурно прогрессирующих научных направлений. Несмотря на высокую публикационную активность ученых, работающих в этой области, авторам не удалось обнаружить глубоких фундаментальных исследований, посвященных дефектам ионно-плазменных покрытий. Проблему дефектов принято относить к категории технологических и, если её и касаться, то не в содержательной части научной публикации, а только в методической. В связи с этим при выполнении настоящей работы, посвященной проблеме дефектов ионно-плазменных покрытий, были поставлены две цели:

— на основе небольшого обзора предложить классификационные основы дефектов этого типа покрытий;

— провести исследование одного из специфических видов таких дефектов, который предложено назвать «дефектами субструктурного происхождения».

Материалы и методы. Для получения покрытий использовались установки вакуумного ионно-плазменного напыления: двухкатодная система PLATIT π^{80}, оснащенная двумя дуговыми испарителями; модернизированная установка TINA-900, оснащенная магнетронными испарителями. Рабочие режимы нанесения покрытий: температура осаждения — 300−450 ºС; давление в вакуумной камере — (1,3−4,7)×10^{-2} мбар; напряжение смещения — 100−150 В. В соответствии с приведенными параметрами вакуумной ионно-плазменной технологии получаемые покрытия относятся к категории PVD. Исследованы покрытия различных нитридных и металлических систем толщиной 1,5−9,0 мкм. Основные результаты по исследованию субструктурных дефектов получены на покрытиях Ti-Al-N. Твердость покрытий выбранных систем превышала 12–15 ГПа, что позволяет отнести их к категории износостойких.

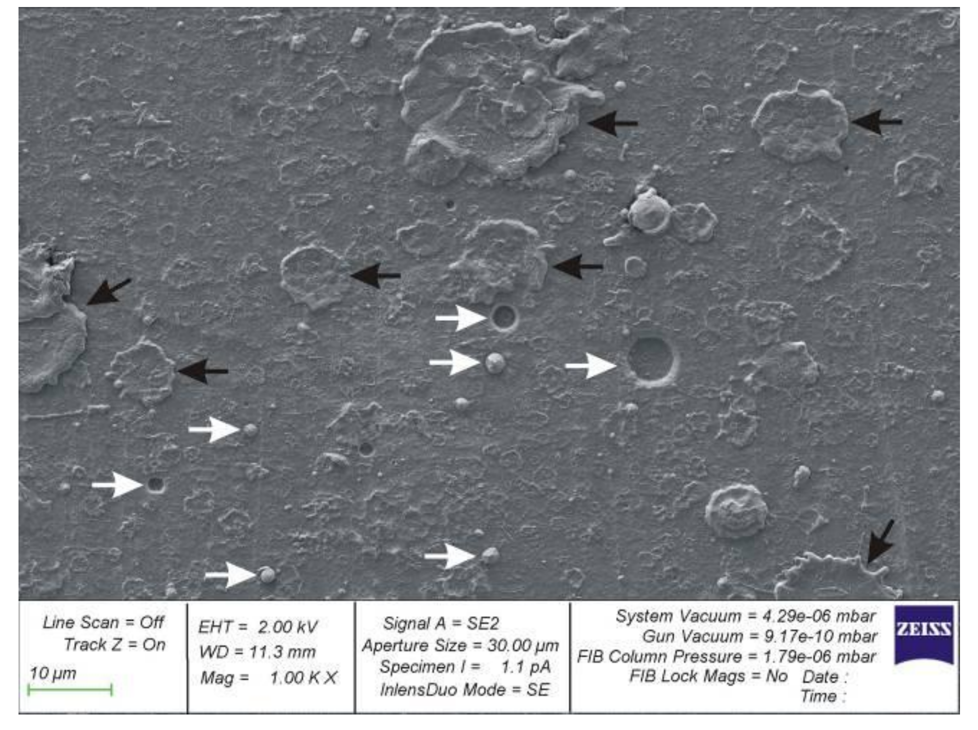
В качестве подложки использовались образцы из различных конструкционных сталей. Влияние состава, структуры и свойств подложки на параметры покрытий не учитывалось. Перед нанесением покрытия в вакуумной камере проводилась очистка поверхности образцов непрерывным потоком ионов Ar в течение 5 мин. Для обеспечения высокой адгезии покрытий на очищенную ионным пучком поверхность образца наносили подслой металла, стоящего в системе первым.

Для исследования микроструктуры покрытий и рельефа их поверхности с высоким разрешением использовался сканирующий двулучевой (электронный/ионный, SEM/FIB) микроскоп ZEISS CrossBeam 340 со встроенным энергодисперсионным рентгеновским детектором X-Max EDAX (Oxford Instruments).

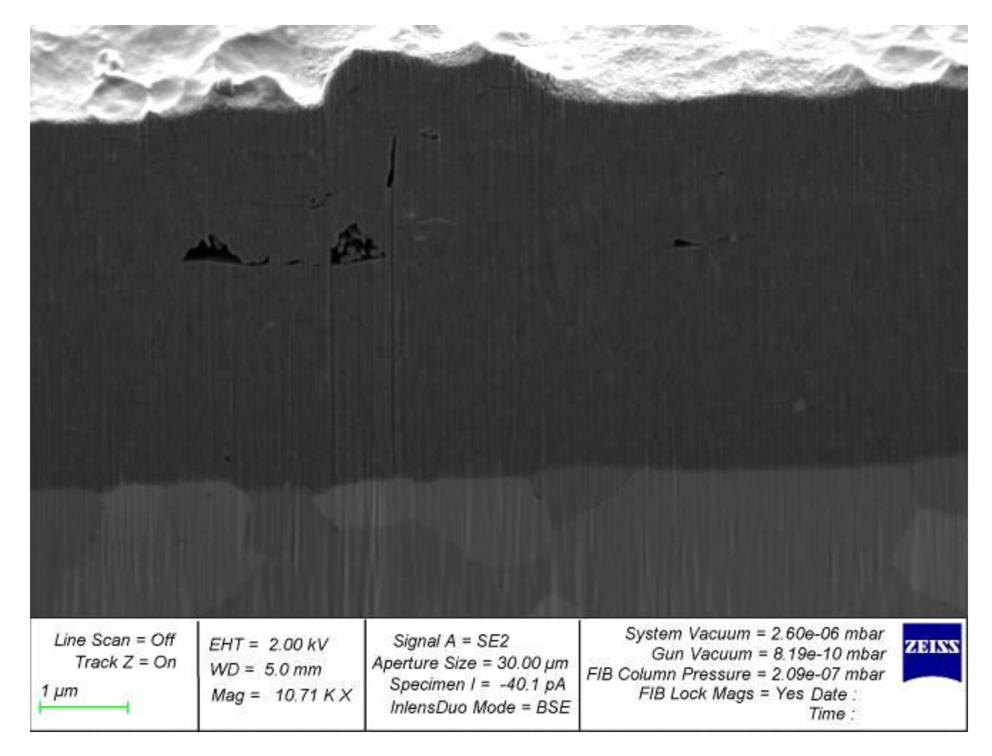
Результаты и их обсуждение. Одним из основных условий бездефектности покрытий, полученных по ионно-плазменной технологии, является минимальная разветвленность рельефа поверхности подложки. Для практической реализации технологии нормативным условием для рельефа считается шероховатость с параметрами не ниже $R_a \leq 0{,}12$ мкм; $R_z \leq 0{,}6$ мкм. Несоблюдение этих условий может приводить к формированию «регулярных дефектов роста» в покрытии при осаждении в виде пористости, деформации кристаллитов и решетки, внутренних напряжений и т. п. Отдельно друг от друга расположенные микронеровности на относительно гладком рельефе подложки приводят к разориентации осей растущих кристаллитов, что вызывает их деформацию и формирует некогерентные, часто пористые, межкристаллитные границы. Высокая плотность микронеровностей приводит к формированию большого объема пористости вблизи границы раздела покрытия и подложки. Большая макронеровность поверхности подложки, например при грубом шлифовании, формирует в покрытии высокие напряжения, которые при слабых когезионных связях в покрытии могут приводить к его расслоению, а при слабой адгезии — к полному отслоению покрытия. Покрытия, содержащие такие дефекты, как правило, не отвечают даже самым мягким требованиям эксплуатации с точки зрения защиты изделий от изнашивания, коррозии и подобных воздействий.

Если указанные требования к шероховатости поверхности подложки соблюдены и покрытие однородно по плотности и структуре, это не исключает появления в нем дефектов случайного характера: субструктурного происхождения и обусловленных наличием капельной фазы.

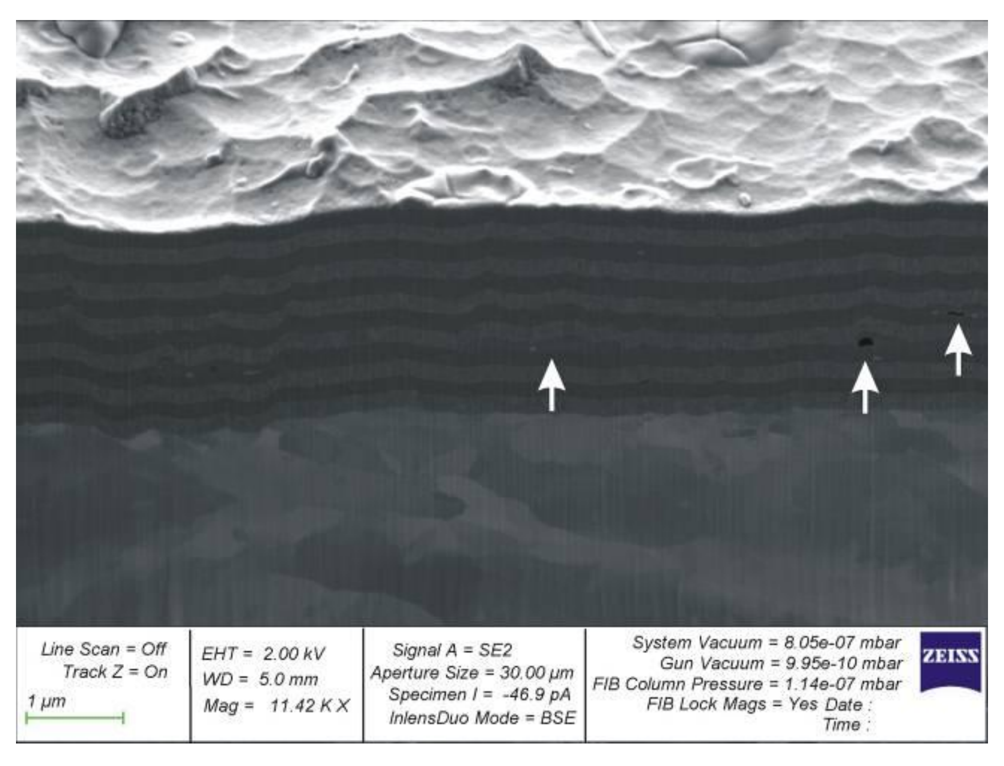
Поскольку появление обоих типов дефектов в конкретном микрообъеме покрытия носит случайный характер, то, в отличие от «регулярных дефектов роста», их логично объединить в класс «стохастических дефектов». Среди них «капельные дефекты» преимущественно формируются при использовании мощных термических испарителей вакуумной установки, а также при осаждении легкоплавких элементов покрытия. «Капельные дефекты» могут быть практически полностью исключены при магнетронном испарении. Примеры «капельных стохастических дефектов» ионно-плазменных покрытий приведены на рис. 1. На поверхности они имеют характерную форму с хлопьевидной конфигурацией, которая отмечена на рис. 1 *а* темными стрелками. Попадая на поверхность покрытия в процессе его нанесения, капельная фаза нарушает ламинарную динамику нормального роста покрытия, что проявляется в виде пор неправильной формы в поперечном сечении покрытия (рис. 1 *б*). В многослойных покрытиях поры и структурные неоднородности, сформировавшиеся в зонах капельной фазы, могут иметь вытянутую форму на границах слоёв покрытия при переходе от слоя с тугоплавкими компонентами к слою с легкоплавким элементом (рис. 1 *в*).



а)



б)



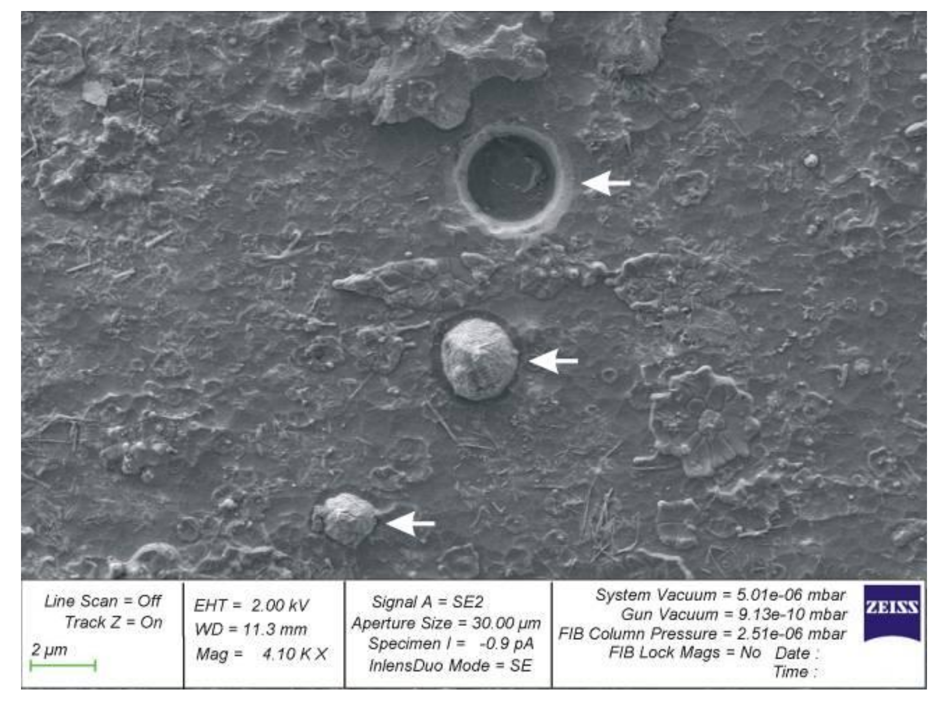
в)

Рис. 1. Примеры капельных дефектов покрытий системы Ti-Al-N, SEM:
а — на поверхности покрытия (показаны темными стрелками); *б* — в поперечном сечении монослойного покрытия;
в — в поперечном сечении многослойного покрытия (показаны светлыми стрелками)

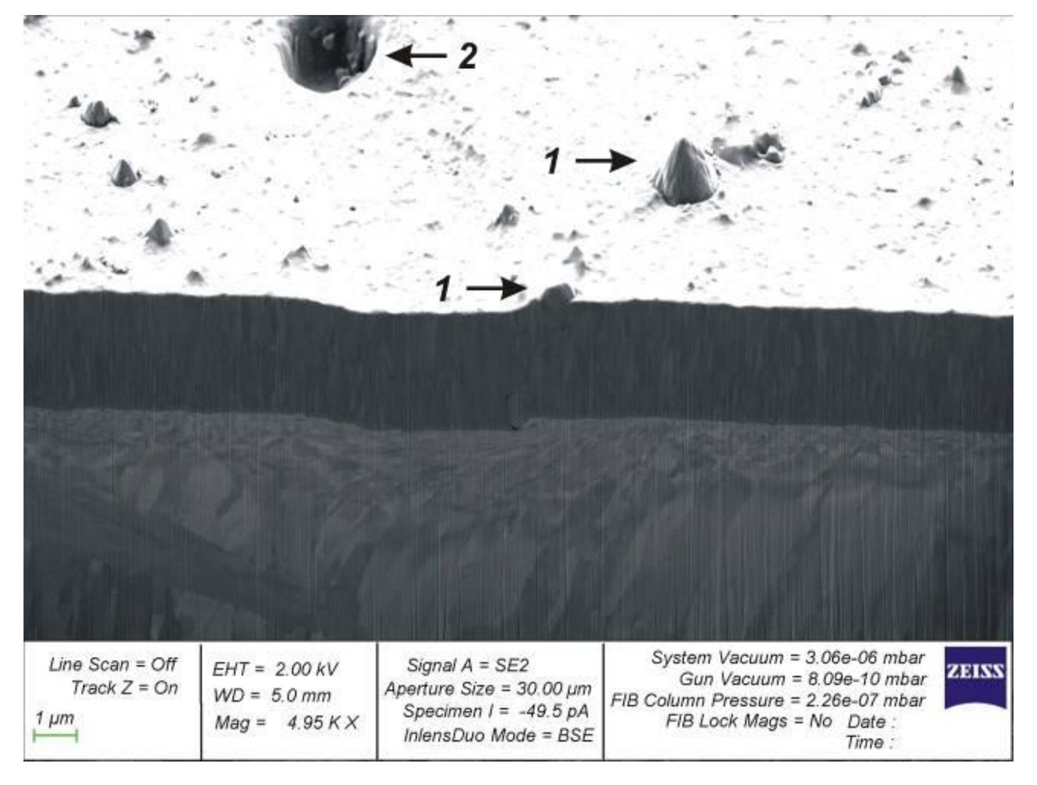
В целом все рассмотренные выше дефекты покрытий имеют технологическое происхождение. Их появление может быть исключено или ограничено оптимизацией технологических параметров ионно-плазменного метода и оборудования. Что касается дефектов субструктурного происхождения, то регулирование или исключение их появления в покрытии представляется маловероятным, поскольку они обусловлены самой природой реального материала покрытий. Результаты исследования таких дефектов являются основным содержанием настоящей работы.

Примеры исследуемых дефектов субструктурного происхождения приведены на рис. 1 *а* (показаны светлыми стрелками) и на рис. 2. Они обладают характерной геометрической формой. В теле покрытия находится цилиндрическая часть дефекта, а над поверхностью покрытия выступает коническая часть. При определенных условиях сформировавшийся дефект отторгается, подвергаясь экструзии, т. е. выдавливанию покрытием, оставляя на месте своей локализации цилиндрические углубления правильной геометрической конфигурации. Если процесс нанесения покрытия при этом продолжается, то углубление заполняется осаждаемыми ионами материала покрытия с большей скоростью, чем остальная плоская поверхность. Вероятно, этому способствуют «краевые эффекты» электромагнитного поля, формируемого напряжением смещения на подложке. В результате происходит «залечивание» цилиндрических углублений в процессе нанесения и покрытие в этой области оказывается достаточно однородным. Если же рассматриваемые дефекты экструдируются из покрытия непосредственно перед окончанием процесса его нанесения, то оставшиеся цилиндрические ниши хорошо просматриваются на поверхности (рис. 1 *а* и 2 *а*–2 *г*).

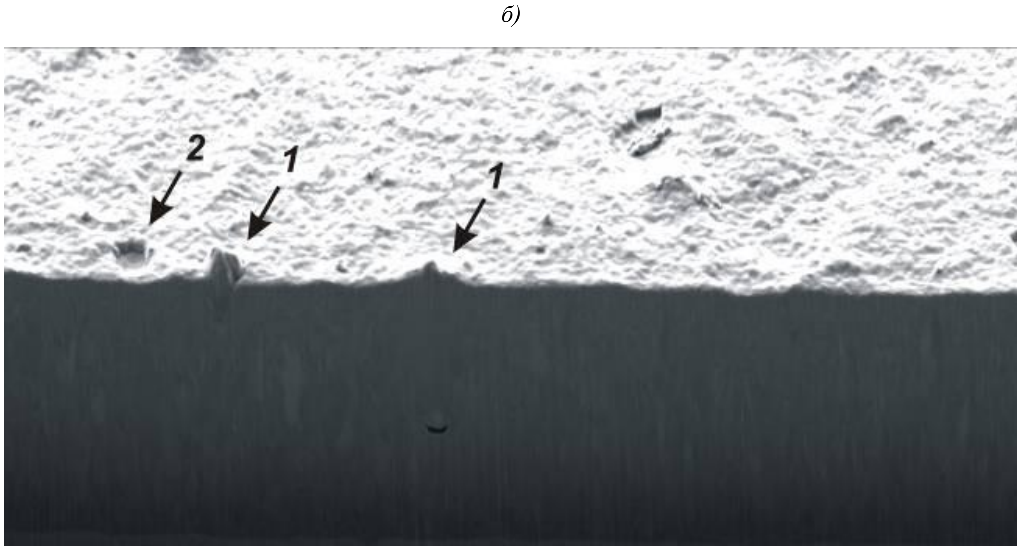
На рис. 2 представлена полная микроскопическая картина различных стадий жизненного цикла субструктурных дефектов PVD-покрытия системы Ti-Al-N. В нормальной проекции показаны три дефекта разного размера, расположенных на расстоянии нескольких микрометров друг от друга (отмечены стрелками). Хорошо видна коническая форма выступающей части локализованных дефектов и цилиндрическая ниша экструдированного дефекта. На рис. 2 *б*–2 *г* эти стадии существования дефектов представлены в объемной картине. Выступающие из покрытия конические «головки» обозначены цифрой 1, цилиндрические ниши — цифрой 2, а цифрой 3 на рис. 2 *г* обозначено место ниши на стадии «залечивания». Объемное изображение получено препарированием кросс-секции FIB, перпендикулярной поверхности покрытия, и последующим наклоном образца в сторону детектора на 15–28°. На рис. 2 *б,* 2 *в* показаны только сечение покрытия и его поверхность, а на рис. 2 *г* — вся кросс-секция целиком. Подготовка кросс-секций позволила получить поперечный разрез исследуемых дефектов (рис. 2 *б*, 2 *в*). Хорошо видно, что их нижнее основание плоское, расположено внутри покрытия на различной глубине и морфологически не связано со структурой покрытия или с рельефом подложки. Практически все видимые на рис. 2 дефекты имеют различные диаметры и высоты, при этом угол при вершине конической «головки», т. е. отношение её диаметра к высоте, изменяется незначительно. Это дает основание полагать, что дефекты растут по мере роста покрытия. Дефекты зарождаются в какой-то момент времени на поверхности уже существующего «растущего» покрытия и в дальнейшем со временем увеличивают свои диаметр и высоту. Рост покрытия и дефекта происходит одновременно и с одинаковой скоростью за исключением опережающего роста «головки» дефекта, так как до момента экструдирования «головка» всё время должна находиться выше уровня поверхности покрытия.

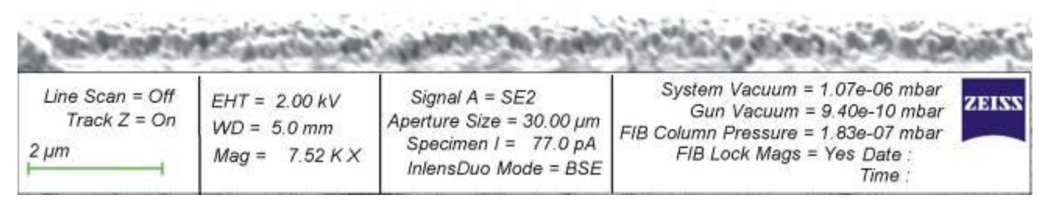


а)

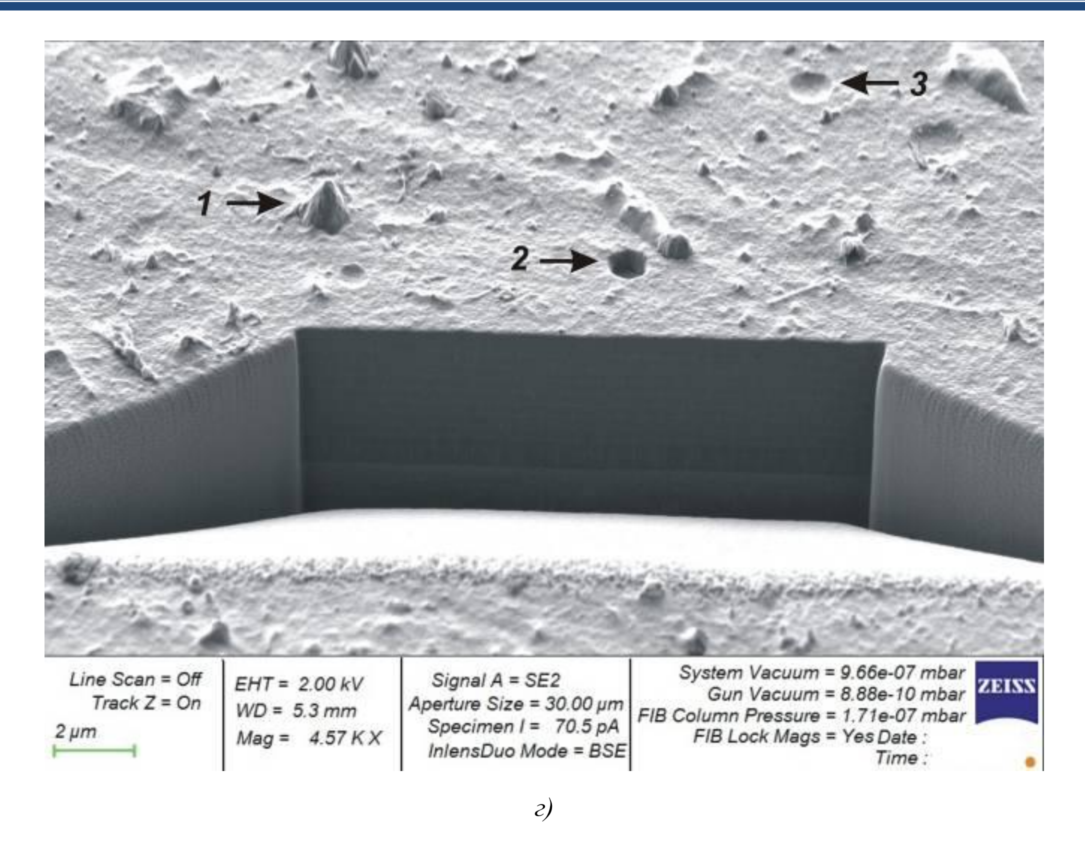

2
1
1
Line Scan = Off
Track Z = On
1 µm
EHT = 2.00 kV
WD = 5.0 mm
Mag = 4.95 K X
Signal A = SE2
Aperture Size = 30.00 µm
Specimen I = -49.5 pA
InlensDuo Mode = BSE
System Vacuum = 3.06e-06 mbar
Gun Vacuum = 8.09e-10 mbar
FIB Column Pressure = 2.26e-07 mbar
FIB Lock Mags = No
Date :
Time :
ZEISS

б)


2
1
1


Line Scan = Off
Track Z = On
2 µm
EHT = 2.00 kV
WD = 5.0 mm
Mag = 7.52 K X
Signal A = SE2
Aperture Size = 30.00 µm
Specimen I = 77.0 pA
InlensDuo Mode = BSE
System Vacuum = 1.07e-06 mbar
Gun Vacuum = 9.40e-10 mbar
FIB Column Pressure = 1.83e-07 mbar
FIB Lock Mags = Yes
Date :
Time :
ZEISS

в)



г)

Рис. 2. Субструктурные дефекты ионно-плазменных покрытий системы Ti-Al-N, SEM: *а* — на поверхности покрытия в нормальной проекции (показаны стрелками); *б–г* — на поверхности покрытия и в сечении кросс-секции FIB

В литературе, как в научной, так и в технологической, касающейся процесса формирования ионно-плазменных покрытий, рассматриваемым субструктурным дефектам часто приписывается капельное происхождение. Считается, что сформировавшаяся в камере капельная фаза, попадая на поверхность покрытия, прожигает её и фиксируется в поверхностном слое. Когда капля кристаллизуется, её объем уменьшается и она выпадает, оставляя цилиндрическую нишу. Этот механизм формирования рассматриваемых дефектов противоречит описанной выше кинетике их роста, основанной на приведенных микрофотографиях, а также опровергается тем экспериментальным фактом, что дефекты подобной геометрии наблюдаются не только при термическом испарении, когда наличия капельной фазы избежать не удается, но и при магнетронном испарении, режим которого исключает формирование капель в камере. Причем, морфология описываемых дефектов при дуговом и магнетронном испарителе идентична. К тому же в покрытиях, полученных магнетронным испарением, указанные дефекты встречаются и в том случае, когда все компоненты покрытия являются тугоплавкими и их температура перехода в жидкое состояние не может быть достигнута при использованных режимах нанесения покрытия [1, 2].

На основе приведенных экспериментальных данных в работе [3] авторами выдвинута и обоснована гипотеза об эндогенном (внутреннем по отношению к покрытию) происхождении рассматриваемых дефектов. Её физическая сущность заключается в следующем. Как известно, реальных бездефектных материалов, в том числе и покрытий, не бывает. В процессе формирования кристаллической структуры покрытия образуются и присущие ей дефекты различной геометрии: точечные, линейные, поверхностные, объемные. Даже самые плотные PVD-покрытия с упорядоченной структурой, например, монослойные тонкие пленки, содержат различные дефекты кристаллического строения [4–8]. Образование дислокаций при росте покрытий, как и при любом процессе кристаллизации, является естественным. С учетом характера осаждения ионно-плазменных покрытий, когда моды касательных напряжений в покрытии практически отсутствуют, наиболее вероятно образование винтовых дислокаций. Если такая дислокация выходит на поверхность покрытия, она формирует винтовую ступеньку. При осаждении, в результате присоединения ионов к незарастающей ступеньке, последняя будет продвигаться по поверхности, вращаясь вокруг неподвижной оси. Так реализуется известный механизм спирального (геликоидального) роста кристалла в направлении оси дислокации [9]. Дислокационный механизм роста использован также для объяснения формирования «кристаллических усов» (вискеров).

При большой плотности винтовых дислокаций на поверхности расстояние между ними невелико и формирующиеся на соседних ступеньках атомные слои сливаются. В этом случае рост поверхности происходит единым фронтом и дает относительно ровную плоскость покрытия [10–12]. Дислокации, удаленные на большие

расстояния, образуют одиночные конусы. Это обусловлено тем, что участки ступеньки, расположенные ближе к оси дислокации, вращаются вокруг неё быстрее и требуют для роста меньшего количества осаждаемых ионов в единицу времени, чем удаленные участки. Таким образом, закручивание спирали при винтовом росте происходит от периферии к оси дислокации, что и определяет коническую форму выступающей части («головки») растущего кристалла (рис. 2). Форма спиралей геликоида, то есть размеры ступенек, определяется скоростью их роста, которая, в свою очередь, зависит от концентрации компонентов в растущем кристаллите. Форма площадок растущих спиралей при быстрой скорости роста и, соответственно, больших пересыщениях близка к круговой, при меньшей скорости роста и, соответственно, малых пересыщениях — полигональная. При увеличении скорости роста (при увеличении пересыщения) угол конуса роста становится более крутым и высота ступеней в таких спиралях большая [13–16].

Приведенные особенности геликоидального роста позволяют говорить о том, что рассматриваемые дефекты ионно-плазменных покрытий (рис. 2) формируются с высокой скоростью роста. На это указывает цилиндрическая форма их «основания», заглубленного в покрытие, и острая коническая форма «головки», выступающей над поверхностью покрытия. Эти геометрические особенности позволяют также предположить обогащение конических кристаллитов одним из компонентов покрытия. По-видимому, более высокая скорость роста спиральных граней рассматриваемого дефекта по сравнению с окружающим его объемом покрытия является основной причиной обособленности рассматриваемых субструктурных дефектов в покрытии и последующего их экструдирования.

Таким образом, с терминологической точки зрения, рассматриваемые нами дефекты PVD-покрытий по происхождению являются субструктурными, поскольку:

— зарождаются на дислокациях;

— по месту локализации являются стохастическими, т. к. возникновение дислокаций в покрытии — процесс случайный;

— по морфологии являются геликоидными, т. к. формируются на винтовых дислокациях и развиваются по механизму спирального роста.

Статистические данные по геометрическим характеристикам субструктурных дефектов в покрытии Ti-Mo приведены на рис. 3. При статистическом анализе в качестве диаметра дефекта d рассматривался максимальный, измеренный по поверхности покрытия, диаметр «головки».

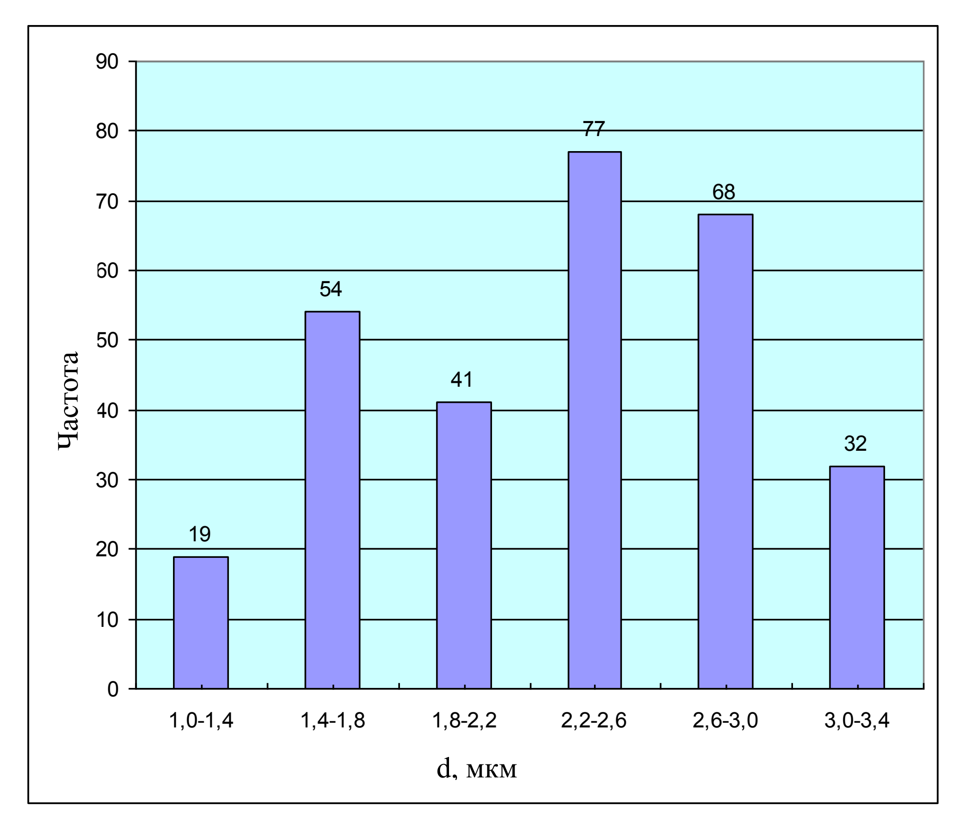


Рис. 3. Распределение по диаметрам d субструктурных дефектов покрытия системы Ti-Mo

Разброс значений d довольно значителен и составляет 0,95−3,3 мкм, среднее значение — $d_{ср.}$ = 2,26 мкм. Для покрытий системы Ti-Al-N значения аналогичных статистических параметров равны:

d = 1,2−4,0 мкм; $d_{ср}$ = 1,91 мкм. Среднее статистическое значение параметра d/h_0, где h_0 — высота конической «головки» дефекта, выступающей над поверхностью покрытия, для всех исследованных составов покрытий составило 1,48, что соответствует углу при вершине конуса «головки» — 73°.

Аналогичный статистический анализ, выполненный по результатам электронно-микроскопических исследований диаметров экструдированных дефектов (ниш) d_e, показал, что разброс значений d_e слишком велик для того чтобы утверждать, что экструзия дефекта происходит при достижении определенного фиксированного критического значения d_e. На рис. 4 видно, что в покрытии системы Ti-Al-N встречаются экструзии самых разных диаметров, разброс значений которых составил d_e = 1,3−4,6 мкм. Этот интервал перекрывается с интервалом значений d, а средние значения сравниваемых параметров также оказываются близки: $d_{ср}$ = 1,91 мкм и $d_{eср}$ = 2,17 мкм.

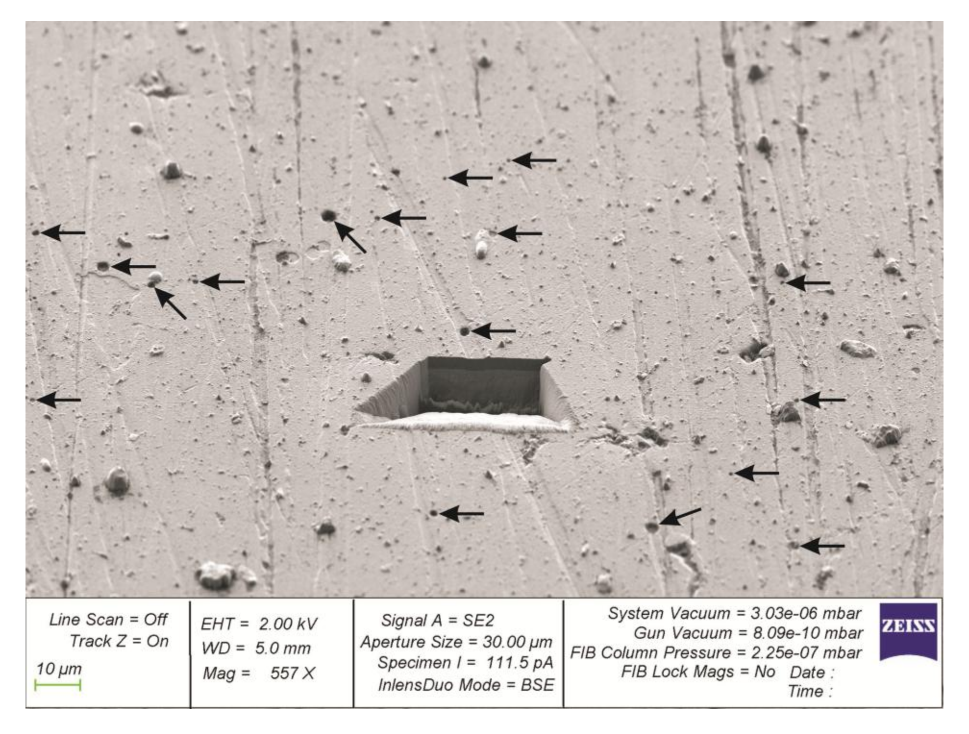


Рис. 4. Поверхность покрытия Ti-Al-N с субструктурными дефектами, SEM: стрелками показаны экструзии дефектов; в центре — прямоугольная кросс-секция FIB

Имеющиеся экспериментальные данные не объясняют, при каких геометрических параметрах растущего субструктурного дефекта происходит его экструдирование из покрытия, но они формируют основу для дальнейшего теоретического изучения этого аспекта, например, на базе классических теорий дислокаций и зародышеобразования.

Заключение. В рамках поставленных авторами целей работа дает определенные промежуточные результаты как по классификационным признакам дефектов ионно-плазменных покрытий, так и по исследованию дефектов субструктурного происхождения. Рассмотренные авторами субструктурные дефекты встречаются в покрытиях различного состава и структуры. Поэтому они могут, несмотря на свой стохастический характер, претендовать на звание «системной ошибки технологии», не оказывающей, впрочем, фатального влияния на структуру и свойства покрытия в силу малости своих размеров. Более или менее полно авторами изучен этот тип дефектов только в покрытиях системы Ti-Al-N, поэтому логическое развитие этого направления исследований предполагает расширение диапазона состава покрытий.

Библиографический список

1. Varavka, V. N. Multilayered Nanocomposite Coatings for Anti-Erosive Protection. Chapter 5. In book: Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications; Ivan A. Parinov (ed.) / V. N. Varavka, O. V. Kudryakov, A. V. Ryzhenkov. — Nova Science Publishers, NY, USA, 2015. — P. 105−132

2. Kudryakov, O. V. Structure and properties of multilayered nanocomposite coatings / O. V. Kudryakov, V. N. Varavka, I.Yu. Zabiyaka [et al.] // Int. J. Res. — 2016. — Vol. 46, no. 4 (2). — P. 117−120.

3. Varavka, V. N. Conditions and mechanisms of the defects formation in vacuum ion-plasma coatings / V. N. Varavka, O. V. Kudryakov, I. Yu. Zabiyaka [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 680 — P. 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/680/1/012021

4. Наноструктурные покрытия : сборник ; пер. с англ. / под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. — Москва : Техносфера, 2011. — 752 с.

5. Freund, L. B. Thin film materials: stress, defect formation and surface evolution / L. B. Freund., S. Suresh. — Cambridge University Press: Boston, 2003. — 750 p.

6. Cleland, A. N. Foundations of Nanomechanics / A. N. Cleland. — Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York, 2003. — 436 p.

7. Сапунов, С. Ю. Строение и свойства никель-цинкового покрытия на стали / С. Ю. Сапунов, О. В. Кудряков, Н. И. Фартушный // Сталь. — 2003. — № 11. — С. 94–96.

8. Вакуумная ионно-плазменная обработка / А. А. Ильин, В. В. Плихунов, Л. М. Петров, В. С. Спектор. — Москва : ИНФРА-М, 2014. — 160 с.

9. Burton, W. K. The growth of crystals and the equilibrium structure of their surfaces / W. K. Burton, N. Cabrera, F. C. Frank // Phil. Trans. R. Soc. Lond. — 1951. — A 243. — P. 299–358.

10. Чернов, А. А. Процессы кристаллизации : Т. 3 Современная кристаллография / Чернов А. А ; под ред. Б. К. Вайнштейна. — Москва : Наука, 1980. — 408 с.

11. Кудряков, О. В. Структурный критерий коррозионной стойкости «белых слоев» / О. В. Кудряков, В. Н. Пустовойт // Материаловедение. — 1998. — № 7. — С. 33–40.

12. Кудряков, О. В. Феноменология мартенситного превращения и структуры стали / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2004. — 200 с.

13. Формирование дислокационной спирали на грани (010) кристалла бифталата калия (БФК) / Л. Н. Рашкович, Е. В. Петрова, О. А. Шустин, Т. Г. Черневич // Физика твердого тела. — 2003. — Т. 45, № 2. — С. 377–383.

14. Ester, G. R. The relationship between crystal growth and defect structure: a study of potassium hydrogen phthalate using x-ray topography and atomic force microscopy / G. R. Ester, R. Price, P. J. Halfpenny // JOP: Applied Physics. — 1999. — Vol. 32, no. 10A. — P. 128−133.

15. Ester, G. R. Observation of two-dimensional nucleation on the {010} face of potassium hydrogen phthalate (KAP) crystals using ex situ atomic force microscopy / G. R. Ester, P. J. Halfpenny // J. Cryst. Growth. — 1998. — Vol. 187, no. 1. — P. 111−117.

16. Murugakoothan, P. Habit modification of potassium acid phthalate (KAP) single crystals by impurities / P. Murugakoothan, R. M. Kumar, P. M. [et al.] // J. Cryst. Growth. — 1999. — Vol. 207, no. 4. — P. 325−329.

Сдана в редакцию 02.06.2020
Запланирована в номер 31.08.2020

Об авторах:

Кудряков Олег Вячеславович, профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: AAM-3486-2020, ScopusID: 6602455202, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1462-4389, kudryakov@mail.ru

Варавка Валерий Николаевич, профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент, ResearcherID: K-8387-2017, ScopusID: 6602988833, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4703-7372, varavkavn@gmail.com

Забияка Игорь Юрьевич, аспирант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID: AAN-7230-2020, ScopusID: 57195480998, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6759-549X, zabiyakaigor@gmail.com

Ядрец Эдуард Александрович, магистрант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2943-2160, xperia1058@gmail.com

Караваев Вадим Петрович, магистрант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7376-6408, super.vud2015@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

О. В. Кудряков — основная идея и план работы, разработка концептуальных классификационных принципов для дефектов вакуумных ионно-плазменных покрытий, анализ экспериментальных данных, теоретическое обоснование гипотезы зарождения «субструктурных дефектов» покрытий, научное руководство работой, редактирование текста статьи. В. Н. Варавка — выработка целей и задач исследования, организация и обеспечение методической и экспериментальной части исследований, подготовка и формирование текста статьи, итоговых выводов и заключения. И. Ю. Забияка — выполнение экспериментальных исследований по методикам растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа и наноиндентирования. Э. А. Ядрец — пробоподготовка образцов для исследования, участие в нанесении экспериментальных ионно-плазменных покрытий, участие в получении необходимых экспериментальных данных. В. П. Караваев — анализ литературных источников и собственных данных по тематике работы, протоколирование и текстуализация экспериментальных данных, подготовка иллюстраций для статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.793.182 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-280-288

Выбор технологий нанесения пленок металлов методами физического осаждения



С. П. Глушко
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (г. Краснодар, Российская Федерация)

Введение. Получение качественных тонких пленок металлов важно для развития технологий нанесения антифрикционных и износостойких покрытий на режущие инструменты или детали пар трения. Используют различные способы физического осаждения пленок с применением технологий катодного (ионного), магнетронного и ионно-лучевого распыления с ассистированием. Цель работы — анализ, сопоставление и определение целесообразности методов физического осаждения тонких пленок металлов при нанесении антифрикционных и износостойких покрытий на режущие инструменты или детали пар трения.
Материалы и методы. Рассмотрены технологии катодного (ионного), магнетронного и ионно-лучевого распыления. Представлены принципиальные схемы, условия и параметры рассматриваемых процессов.
Результаты исследования. Перспективная технология нанесения тонких пленок, легирования и упрочнения поверхностей металлических деталей — магнетронное распыление. Магнетроны непрерывного действия применяют для нанесения покрытий сложного состава или многослойных покрытий на плоские подложки. Ионно-лучевое распыление рассматривают как медленное распыление поверхности мишени под действием бомбардировки потоком ионов с высокой энергией и осаждение на поверхности подложки. При ионной имплантации происходит легирование поверхности металлов атомами отдачи, которые получают высокую энергию от ускоренных ионов и перемещаются вглубь на несколько нанометров. Это позволяет получать сверхтонкие легированные слои. Низкая температура ионной имплантации, возможность достаточно точного контроля глубины и профиля распределения примеси создают предпосылки автоматизации технологического процесса. Следы изнашивания сильнее окислены при одних и тех же условиях изнашивания на имплантированной стали по сравнению со сталью без имплантации. Неравновесный процесс при ионной имплантации вызывает образование таких сплавов в поверхностных слоях, которые невозможно получить в обычных условиях из-за диффузии компонентов или ограниченной растворимости. Ионная имплантация позволяет получить в поверхностном слое сплавы определенного состава. Свойства поверхности можно оптимизировать без связи с объемными свойствами материала. Имплантация возможна при низких температурах без заметного изменения размеров изделия.
Обсуждение и заключение. У катодного (ионного), магнетронного и ионно-лучевого распыления есть общие достоинства: благодаря относительно низкой температуре подложка не перегревается; возможно получение равномерных покрытий; точно воспроизводится химический состав осаждаемых покрытий. Остальные достоинства и недостатки рассматриваемых методов индивидуальны. Результаты могут быть использованы для создания тонких пленок путем чередования процессов магнетронного, а затем ионно-лучевого напыления, что позволяет получать пленки, равномерно модифицированные по глубине. Это важно при производстве деталей пар трения и режущего инструмента для повышения их качества.

Ключевые слова: пленка металла, физическое осаждение, антифрикционное покрытие, износостойкое покрытие, ионное распыление, магнетронное распыление, ионно-лучевое распыление.

***Для цитирования*:** Глушко, С. П. Выбор технологий нанесения пленок металлов методами физического осаждения / С. П. Глушко // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 280−288. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-280-288



Selection of technologies for metal film application using physical deposition techniques

S. P. Glushko
Kuban State Technological University (Krasnodar, Russian Federation)

Introduction. Obtaining high-quality thin metal films is important for advances in the technologies of applying antifriction and wear-resistant coatings on cutting tools or parts of friction couples. Various techniques of physical film deposition are applied using technologies of cathode (ion), magnetron and ion beam assisted sputtering. The work objective is to analyze, compare and determine the feasibility of techniques for the physical deposition of thin metal films when applying antifriction and wear-resistant coatings on cutting tools or parts of friction couples.
Materials and Methods. Technologies of cathode (ionic), magnetron and ion-beam sputtering are considered. Schematic diagrams, conditions and parameters of the considered processes are presented.
Results. An advanced technology for the deposition of thin films, alloying and hardening of the surfaces of metal parts is magnetron sputtering. Continuous wave (cw) magnetrons are used to apply coatings of complex composition or multilayer coatings on flat substrates. Ion beam sputtering is considered a slow sputtering of the target surface by bombardment with a high-energy ion beam and deposition on the substrate surface. Under the ion implantation, the surface of metals is doped with recoil atoms, which receive high energy from accelerated ions and move a few nanometers deeper. This enables to obtain ultra-thin doped layers. Low temperature of ion implantation, the possibility of sufficiently accurate control of the depth and the impurity distribution profile, create the prerequisites for the process automation. Wear tracks are more acidified under the same wear conditions on implanted steel compared to non-implanted steel. The nonequilibrium process under ion implantation causes the formation of such alloys in the surface layers that cannot be obtained under normal conditions due to diffusion of components or limited solubility. Ion implantation makes it possible to obtain alloys of a certain composition in the surface layer. Surface properties can be optimized without reference to the bulk properties of the material. Implantation is possible at low temperatures without a noticeable change in the size of the product.
Discussion and Conclusion. Cathode (ion), magnetron and ion-beam sputtering have common advantages: due to the relatively low temperature, the substrate does not overheat; it is possible to obtain uniform coatings; the chemical composition of the deposited coatings is accurately reproduced. The rest of the advantages and disadvantages of the considered methods are individual. The results can be used to create thin films through alternating magnetron and then ion-beam deposition processes, which enables to obtain films uniformly modified in depth. This is important in the production of parts of friction couples and cutting tools to improve their quality.

***Keywords*:** metal film, physical deposition, anti-friction coating, wear-resistant coating, ion sputtering, magnetron sputtering, ion-beam sputtering.

For citation: Glushko, S. P. Selection of technologies for metal film application using physical deposition techniques. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 280‒288. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-280-288

Введение. Получение качественных тонких пленок металлов важно для развития технологий нанесения антифрикционных и износостойких покрытий на режущие инструменты или детали пар трения [1–6].

Термовакуумный метод, который применялся ранее, не обеспечивал воспроизводимость свойств пленок, особенно при осаждении материалов сложного состава. Переход к непрерывным технологическим процессам способствовал развитию ионно-плазменных процессов осаждения тонких пленок. В настоящее время используют различные способы физического осаждения пленок с применением технологий катодного (ионного) распыления, магнетронного распыления и ионно-лучевого распыления с ассистированием. Так создаются тонкие пленки, которые невозможно получить другими способами (например, пленки тугоплавких или многокомпонентных материалов). Цель работы — анализ и сопоставление целесообразности методов физического осаждения тонких пленок металлов при нанесении антифрикционных и износостойких покрытий на режущие инструменты или детали пар трения.

Применение катодного (ионного), магнетронного и ионно-лучевого распыления позволяет полностью автоматизировать получение пленочных покрытий в технологических установках непрерывного действия.

Материалы и методы. При катодном (ионном) распылении ионы разряженного газа бомбардируют и разрушают материал катода [1]. Его атомы испаряются и конденсируются на подложке.

Принципиальная схема процесса нанесения тонких пленок катодным распылением приведена на рис. 1.

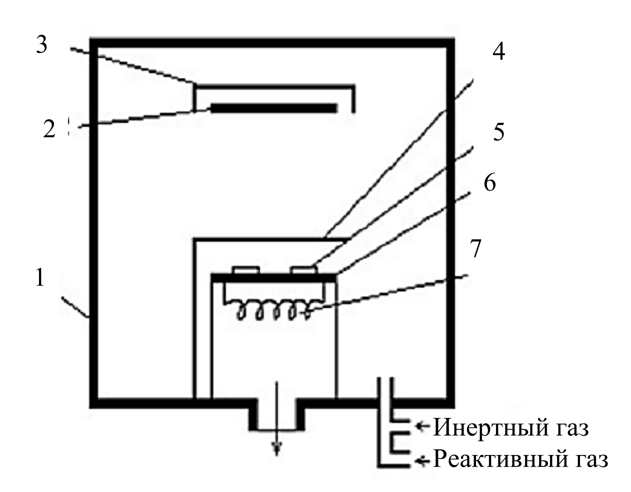


Рис. 1. Принципиальная схема процесса нанесения тонких пленок катодным распылением: 1 — камера; 2 — катод; 3 — заземленный экран; 4 — заслонка; 5 — подложка; 6 — заземленный анод; 7 — резистивный нагреватель подложки

При таком распылении из камеры, в которой установлены анод и катод, выкачивают воздух до состояния вакуума с давлением 10^{-4} Па. Затем в камеру подают инертный газ (например, аргон) с давлением 1–10 Па) [1]. При подаче постоянной высокой разности потенциалов 1–5 кВ на катод и анод между ними возникает тлеющий разряд, в котором образуются положительно заряженные ионы инертного газа. Ионы ускоряются электрическим полем и бомбардируют катод, вызывая испарение и распыление атомов материала, оседающих на подложке в виде тонкой пленки [1, 3].

Начальные представления о катодном распылении базировались на преобладающей роли химических процессов. Считалось, что перенос материала катода на покрываемую подложку состоит:

а) в образовании на поверхности подложки непрочных соединений с материалом катода,

б) в испарении соединений материалов подложки и катода,

в) в частичном распаде этих соединений.

Инертные газы в ионизированном состоянии (в отличие от нормального состояния) могут проявлять некоторую химическую активность.

Однако невозможно объяснить химическими процессами все случаи такого распыления, поскольку имеет место катодное распыление слабо летучих соединений (например, AL_2O_3), которые практически не могут испаряться при температурах нагрева катода.

Поэтому был предложен не химический, а физический механизм катодного распыления. Согласно этому подходу, частицы материала покидают поверхность катода из-за того, что атомы материала катода получают энергию непосредственно от бомбардирующих атомов или молекул. Существуют два представления о такой передаче энергии.

1. Удары бомбардирующих атомов приводят к сильному локальному повышению температуры микроскопических участков поверхности материала катода, вследствие чего он испаряется.

2. Бомбардирующий атом передает кинетическую энергию атому поверхности катода. В результате разрушаются связи атома катода с соседними атомами, и он вылетает с поверхности катода.

Такой механизм лучше представляет физическое распыление, особенно в соответствии с работами по ионной и нейтральной эмиссии (т. е. эмиссии нейтральных атомов) твердых тел при бомбардировке ионами.

Результаты исследования. При рассмотрении катодного распыления в целом следует иметь в виду как физический, так и химический механизмы. Один из них может преобладать в зависимости от реальных условий процесса.

Ниже перечислены достоинства метода катодного распыления.

1. Процесс протекает при относительно низкой температуре, подложка не перегревается.

2. Можно получить равномерные по толщине покрытия.

3. Точно воспроизводится химический состав осаждаемых покрытий.

4. Площади покрытий довольно велики, так как материал наносится на подложку не из точечного источника.

5. Получаемые покрытия имеют высокую адгезию к материалу подложки, благодаря высокой энергии конденсирующихся атомов.

6. Удается достичь высокого коэффициента использования материала покрытия.

Перечислим недостатки метода катодного распыления.

1. Пленки характеризуются высоким уровнем механических напряжений.

2. Скорость осаждения — низкая (0,3–2 нм/с).

3. Рабочее давление в камере в ряде случаев составляет 1–10 Па, поэтому пленки загрязняются рабочим газом.

Перспективной технологией нанесения тонких пленок, легирования и упрочнения поверхностей металлических деталей является магнетронное распыление. Его преимущества:

— высокая скорость получения пленочных покрытий;

— низкий уровень загрязнения посторонними включениями, в том числе газами;

— низкая температура нагрева материала подложки;

— возможность распыления электропроводящих и диэлектрических материалов;

— возможность получения сверхтонких пленок (< 20 нм) с малыми дефектами;

— безынерционность технологического процесса.

Магнетронное распыление используется для нанесения сверхтонких пленок хрома, алюминия (и его сплавов) и различных тугоплавких металлов.

Схема движения напыляемых частиц в магнетронной распылительной системе (в магратроне) показана на рис. 2.

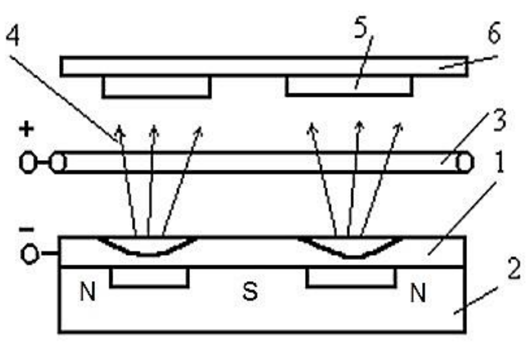


Рис. 2. Схема движения напыляемых частиц в магнетронной распылительной системе: 1 — катод-мишень; 2 — постоянный магнит; 3 — анод; 4 — поток распыляемых частиц; 5 — подложка; 6 — подложкодержатель

Магнетронная система монтируется в камере вакуумной распылительной установки, из которой откачивается воздух. В качестве рабочего газа используется аргон или смесь инертных газов. Поддерживается постоянное общее давление с точностью ± 5 %. Выбирая парциальное давление компонентов газовой смеси, можно в широком диапазоне менять характеристики покрытия, в том числе электрические.

Рабочая среда в камере меняется путем варьирования количества кислорода, азота, диоксида углерода, сернистых газовых соединений. Это позволяет создавать тонкие пленки оксидов, нитридов, карбидов, сульфитов разных материалов, которые нельзя, например, получить термическим испарением.

Состав соединений в пленочных покрытиях, содержащих оксиды, карбиды, нитриды, напрямую зависит от чистоты материалов и газов. Поэтому для распыления следует использовать химически чистые материалы. Для управления парциальным давлением следует оснастить вакуумные установки насосами, которые обеспечивают постоянную скорость откачки в требуемом диапазоне давлений.

В распылительных магнетронных системах используются источники постоянного тока. Постоянное электрическое поле над мишенью-катодом формирует тлеющий разряд, создает плазму и вызывает бомбардировку ионами мишени (катода). Замкнутое магнитное поле магнетронной распылительной системы концентрирует плазму у поверхности мишени-катода.

Под действием бомбардировки ионами из мишени-катода эмитируют электроны, которые собираются и удерживаются магнитным полем. Электроны совершают сложное циклическое движение над поверхностью мишени-катода. До попадания на анод электроны сталкиваются с атомами рабочего газа (аргона) и тратят при столкновении значительную часть энергии на ионизацию рабочего газа (аргона). Это увеличивает количество ионов у поверхности мишени-катода, усиливает бомбардировку, повышает скорость распыления материала, осаждения и образования пленки.

В магнетронных распылительных системах электрические и магнитные поля пересекаются, что создает магнитную ловушку у распыляемой поверхности мишени и увеличивает скорость распыления. Магнитная ловушка захватывает высокоэнергетические вторичные электроны. Они не участвуют в бомбардировке подложки, и этим объясняется ее незначительный нагрев.

Скорость осаждения материала покрытия в процессе магнетронного распыления зависит от давления рабочего газа в камере установки, силы тока и мощности разряда, что устанавливает строгие требования к источникам энергии. Для обеспечения стабильности процесса необходимо поддерживать ток разряда с точностью ± 2 %. Если процесс стабилизируется мощностью разряда, он должен поддерживаться с точностью ± 20 Вт в диапазоне регулирования 0–10 кВт.

Средняя скорость осаждения молибдена равна 12–37 нм/с при следующих параметрах установки:

— мишень из кобальта в виде плоского диска диаметром 150 мм,

— источник питания мощностью 4 кВт,

— подложка из молибдена расположена на расстоянии 60 мм от источника питания [7].

Температура нагрева подложки в этом случае приблизительно равна температуре термического испарения в вакууме легкоплавких металлов, но намного ниже, чем температура испарения тугоплавких металлов. Это позволяет наносить тонкие пленки на материалы с низкой термостойкостью (например, пластмассы).

Стабильность осаждения пленки на подложку обеспечивается правильно выбранными параметрами магнетронной распылительной системы:

— напряжение питания электродов,

— ток разряда,

— плотность тока на мишени,

— удельная мощность,

— индукция магнитного поля,

— давление рабочего газа в камере.

Разность потенциалов между катодом и анодом не превышает 1000 В. Ток электрического разряда устанавливается опытным путем. Плотность тока на мишени — около 200 мА/см², но в центральной зоне распыления может быть больше. Удельная мощность электрического разряда — от 40 до 100 Вт/см². Она определяется теплопроводностью осаждаемого материала и условиями охлаждения.

Вольт-амперная характеристика электрического разряда между анодом и катодом зависит от рабочего давления газа и индукции магнитного поля. При уменьшении в камере установки давления и индукции магнитного поля вольт-амперные характеристики разряда смещаются в область высоких рабочих напряжений.

Скорость осаждения материала пленки почти линейно зависит от мощности разряда. При повышении мощности разряда скорость осаждения увеличивается.

Мощность разряда достигает максимума при увеличении индукции магнитного поля до 0,08–0,1 Тл и низком рабочем давлении газа (от 1 до 10 Па). Если рабочее давление газа высокое, максимальная мощность разряда достигается при индукции магнитного поля 0,04–0,06 Тл.

Несмотря на эти преимущества, а также непосредственное напыление диэлектриков высокочастотным магнетроном, следует отметить, что этот способ отличается низкой скоростью осаждения пленки, то есть низкой производительностью. Есть сложности и в согласовании источника питания магнетронной установки с нагрузкой при работе на высоких частотах. Кроме того, источник питания должен иметь систему гашения дуговых разрядов, которые являются причиной нестабильности параметров магнетронной установки.

По принципу работы магнетронные вакуумные установки с ионно-плазменными источниками распыления делятся на два вида — периодического и непрерывного действия.

В магнетронных установках периодического действия распылительные средства располагают по оси цилиндрической камеры либо по ее образующей. В первом случае используют цилиндрические распылители, во втором — планарные. Подложки перемещаются через область плазмы.

Магнетроны периодического действия применяют для нанесения покрытий на диэлектрики. В этом случае для снижения температуры подложки следует:

— улучшать тепловой контакт подложки с системой охлаждения;

— изготавливать детали системы охлаждения из материалов с высокой теплопроводностью либо повышать теплопроводность газовой прослойки между системой охлаждения и пленкой;

— охлаждать узлы системы охлаждения до температуры 243–253 ºК;

— расширять зону нанесения покрытия и увеличивать размер системы охлаждения.

Высокая скорость выделения газов подложки, а также возможное взаимодействие ионизированных газов с осаждающимся материалом обусловливают применение конденсационных вакуумных ловушек.

Магнетроны непрерывного действия применяют для нанесения покрытий сложного состава или многослойных покрытий на плоские подложки [8]. Как правило, установки непрерывного действия состоят из последовательности плоских прямоугольных камер, разделенных шлюзами и затворами. В установках

непрерывного действия применяется либо распыление сверху вниз, либо вертикальное перемещение подложек и боковое размещение распылительных устройств.

При работе магнетронной распылительной системы управляют, как правило, одним параметром. Остальные фиксируют на оптимальном значении, регулируя толщину пленок, изменяя время осаждения и т. д.

Ниже перечислены достоинства магнетронного распыления.

1. Процесс протекает при относительно низкой температуре, подложка не перегревается.

2. Можно получить равномерные по толщине покрытия.

3. Точно воспроизводится химический состав осаждаемых покрытий.

4. Процесс протекает быстро. Высокая скорость распыления материалов при низких рабочих напряжениях (600–800 В) и низком давлении рабочего газа ($5\cdot10^{-1}$ – 10 Па).

Назовем недостатки магнетронного распыления.

1. Высокие требования к чистоте и сухости защитного газа (аргона).

2. Для защиты от окисления нужны шлюзы перед разгрузочной камерой. В камеру следует подавать защитный газ.

3. Вероятность пробоев между анодом и катодом.

4. Высокие требования к точности позиционирования подложек относительно испарителей для обеспечения равномерности пленок по толщине и по составу.

Ионно-лучевое распыление применяется для нанесения тонких пленок в вакууме, а также для модификации и легирования поверхностных слоев металлов имплантацией ионов из сепарированных пучков.

На рис. 3 изображена схема установки для ионно-лучевого распыления.

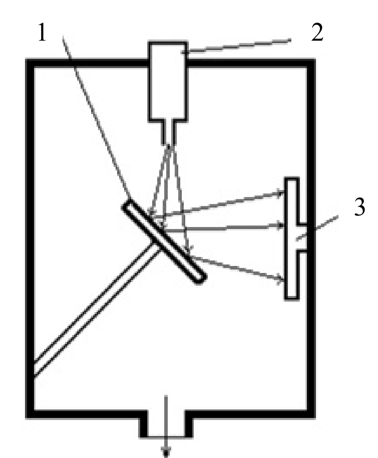


Рис. 3. Схема установки для ионно-лучевого распыления: 1 — мишень; 2 — источник ионов; 3 — подложка

Ионно-лучевое распыление рассматривают как медленное распыление поверхности мишени под действием бомбардировки потоком ионов с высокой энергией и осаждение на поверхности подложки. Этот процесс имеет физическую, а не химическую природу. Атомам поверхности от падающего иона передается импульс:

— направленный от поверхности,

— достаточно сильный, чтобы атомы покинули поверхность.

При ионной имплантации происходит легирование поверхности металлов атомами отдачи, которые получают высокую энергию от ускоренных ионов и перемещаются вглубь на несколько нанометров. Это позволяет получать сверхтонкие легированные слои. Низкая температура ионной имплантации, возможность достаточно точного контроля глубины и профиля распределения примеси создают предпосылки автоматизации технологического процесса.

Ионная имплантация также используется для модифицирования поверхностных свойств металлов: повышения твердости, увеличения износостойкости, коррозионной и радиационной стойкости, повышения сопротивления усталостному разрушению, снижения коэффициента трения. Ионную имплантацию используют для получения антифрикционных износостойких поверхностей. Для деталей машин износостойкость материала, как правило, является более важной характеристикой, чем его твердость или коэффициент трения [4–8].

Отмечено, что, например, большая доза имплантированного азота может существенно уменьшить интенсивность изнашивания [9]. Кроме того, установлено, что имплантация ионов инертных газов (например, неона, аргона), создающая напряжения сжатия в поверхностном слое, не приводит к снижению интенсивности

изнашивания. Однако имплантация атомов внедрения (бор, углерод и азот) при дозах облучения ионами 10^{17} см $^{-2}$ была весьма эффективной, причем данное влияние по толщине изнашиваемого слоя значительно превосходило глубину внедрения имплантированных ионов.

Имплантируемые атомы внедрения при ионно-лучевом распылении (например, азот, углерод или бор) сегрегируют даже при нормальной температуре. Это блокирует их движение в осаждаемом материале, упрочняет поверхностный слой и повышает износостойкость.

В процессе изнашивания при трении протекают два процесса, действие которых объясняет влияние ионной имплантации на слой большей глубины, чем глубина проникновения ионов.

Первый — зарождение и развитие новых дислокаций под действием высоких локальных нагрузок на пятнах контакта микронеровностей поверхности. Под действием поля напряжений, возникающего вокруг скопления дислокаций, атомы примеси диффундируют вглубь раствора.

Второй — локальный разогрев поверхности в точках контакта. Например, при испытании материалов на износостойкость температура на микронеровностях достигает 600–700 °С. Движение примесей происходит под действием больших температурных градиентов. Диффузия вдоль линий дислокаций является наиболее вероятным механизмом переноса.

Коэффициент трения у сталей также снижается под действием ионной имплантации благодаря двум эффектам.

1. Мостики сварки в контакте двух поверхностей становятся хрупкими вследствие заторможенного дислокационного движения.

2. Окисная пленка является более стойкой в этих условиях, и ее присутствие снижает адгезию.

Анализ подтвердил, что следы изнашивания сильнее окислены при одних и тех же условиях изнашивания на имплантированной стали по сравнению со сталью без имплантации.

При рассмотрении композиционного материала (например, карбида вольфрама на кобальтовой связке) возникает более сложная ситуация. При высоких температурах износ сопровождается диффузией, кобальт выносится на поверхность, а такие вещества, как железо (из обрабатываемого металла), диффундируют в объем, вызывая выкрашивание зерен карбида. При низких температурах более вероятны адгезия и истирание кобальта, причем процесс интенсифицируется, если сдвиговые усилия достигают величин, достаточных для выдавливания кобальтовой мягкой связки между зернами карбида.

Имплантированные ионы азота или углерода могут смещаться к дислокациям в кобальте, как и в сплавах железа. Кобальт в отличие от железа не образует стабильных нитридов или карбидов, поэтому имплантированные атомы останутся в твердом сплаве. С помощью электронного микроскопа были обнаружены мартенситные превращения в кобальтовой связке имплантированного твердого сплава на основе карбида вольфрама, что свидетельствует об искажении кристаллической решетки и возможном упрочнении при растворении азота в твердом сплаве.

Кроме того, азот может сегрегировать к поверхностям раздела карбидных зерен и кобальтовой связки, усиливая химические связи на этих поверхностях и упрочняя композит.

При ионной имплантации в вольфрамовых твердых сплавах (карбид вольфрама на кобальтовой связке) происходит миграция имплантированного азота или углерода по узлам внедрения кобальтовой связки. Ее ускоряют большие термические градиенты под микронеровностями поверхностей. По этой причине, если условия изнашивания относительно мягкие и охлаждение интенсивное, имплантированные атомы малоподвижны и процесс должен протекать менее интенсивно.

Перечислим достоинства ионной имплантации.

1. Процесс протекает при относительно низкой температуре, подложка не перегревается.

2. Можно получить равномерные по толщине покрытия.

3. Точно воспроизводится химический состав осаждаемых покрытий.

4. Процесс протекает быстро.

5. Процесс рекомендуется использовать для легирования примесями с низкими растворимостями в твердой фазе или с низкими коэффициентами диффузии.

Неравновесный процесс при ионной имплантации вызывает образование таких сплавов в поверхностных слоях, которые невозможно получить в обычных условиях из-за диффузии компонентов или ограниченной растворимости.

Ионная имплантация позволяет получить в поверхностном слое сплавы определенного состава. Свойства поверхности можно оптимизировать без связи с объемными свойствами материала. Имплантация возможна при низких температурах без заметного изменения размеров изделия.

Необходимо отметить недостатки ионной имплантации.

1. Имплантация является процессом обработки поверхности только в зоне прямого действия пучка ионов из-за расфокусировки луча при больших отклонениях. Поэтому с ее помощью невозможно обрабатывать подложки со сложной геометрией поверхности.

2. Малая глубина проникновения пучка ионов не позволяет наносить покрытия достаточной толщины (>1 мкм) на детали пар трения и режущий инструмент.

3. Используется довольно сложное оборудование.

Обсуждение и заключение. Сравнительный анализ методов физического осаждения пленок показал их преимущества и недостатки.

У катодного (ионного), магнетронного и ионно-лучевого распыления есть общие достоинства.

1. Процессы протекают при относительно низкой температуре, подложка не перегревается.

2. Возможно получение равномерных по толщине покрытий.

3. Точно воспроизводится химический состав осаждаемых покрытий.

Остальные достоинства и недостатки рассматриваемых методов индивидуальны.

Процесс катодного (ионного) распыления позволяет наносить пленки на достаточно большие площади с высоким коэффициентом использования распыляемого материала, но имеет самую низкую скорость осаждения (0,3–2 нм/с). Пленки обладают высокой адгезией к подложке, но характеризуются высоким уровнем механических напряжений. Кроме того, пленки загрязняются рабочим газом, так как рабочее давление в камере может составлять 1–10 Па. Тем не менее катодное (ионное) распыление позволяет использовать в качестве мишени тугоплавкие материалы и синтезировать многокомпонентные соединения.

Универсальность — основное достоинство магнетронных распылительных систем. В них можно использовать распыление с применением постоянного тока, высокочастотное распыление и реактивное ионно-плазменное пленочное осаждение.

Преимущества магнетронных распылительных систем:

— высокая скорость осаждения пленочных покрытий (несколько мкм/мин) и возможность ее регулирования в достаточно широком диапазоне;

— высокая химическая чистота пленочных покрытий;

— низкое тепловое влияние на подложку и осаждаемое пленочное покрытие;

— возможность нанесения на неподвижные подложки равномерных по толщине пленок.

Ионное напыление имеет следующие преимущества по сравнению с магнетронным:

— низкое рабочее давление газа (10^{-3} – 10^{-2} Па);

— целостность химического состава материала мишени (катода);

— управление энергией ионов, бомбардирующих мишень;

— увеличение скорости распыления мишени ионной бомбардировкой под углом к ее поверхности (невозможно при магнетронном распылении).

Для осаждения тонких пленок диэлектрических и композиционных материалов при ионно-лучевом распылении предлагаются источники ионов с холодным катодом, которые создают направленные радиально сходящиеся или радиально расходящиеся ионные пучки [3, 8].

Источники ионов при ионно-лучевом распылении с холодным катодом имеют следующие достоинства:

— способствуют формированию ионных пучков как инертных, так и химически активных газов (например, O_2);

— имеют длительный ресурс холодного катода;

— обеспечивают однородность химического состава пленочных покрытий с большими площадями на неподвижных подложках;

— позволяют автоматизировать процесс осаждения пленок диэлектрических и композиционных материалов с заданными свойствами.

Для получения тонких пленок эффективно применение методики чередования процессов магнетронного, а затем ионно-лучевого напыления. Так получаются пленочные покрытия, равномерно модифицированные по глубине [10]. Это важно при производстве деталей пар трения [5–7] и режущего инструмента для повышения их качества [11].

Библиографический список

1. Петухов, В. Ю. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок / В. Ю. Петухов, Г. Г. Гумаров. — Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2010. — 87 с.

2. Левичев, В. В. Электронные и фотонные устройства: принцип работы, технологии изготовления / В. В. Левичев. — Санкт-Петербург : Ун-т ИТМО, 2015. — 65 с.

3. Григорьев, Ф. И. Осаждение тонких пленок из низкотемпературной плазмы и ионных пучков в технологии микроэлектроники / Ф. И. Григорьев. — Москва : Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2006. — 35 с.

4. Белый, А. В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. — Москва : Машиностроение, 1991. — 208 с.

5. Глушко, С. П. Синтез критерия качества биметаллических подшипников скольжения / С. П. Глушко, С. Г. Денисенко // Конструкционная прочность, долговечность, упрочнение материалов и деталей машин : тез. докл. всесоюз. науч. конф. — Волгоград : Дом науки и техники, 1990. — С. 202–204.

6. Денисенко, С. Г. Оптимизация технологии производства подшипников скольжения из биметалла сталь-бронза / С. Г. Денисенко, С. П. Глушко // Современные методы наплавки, упрочняющие покрытия и используемые материалы. IV Украинская республиканская науч.-тех. конф. : тезисы докладов. — Харьков : ХАДИ, 1990. — С. 70–71.

7. Асцилене, Д. Л. Техника магнетронного распыления тонких пленок. Газофазное осаждение тонких пленок / Д. Л. Асцилене // Современные технологии в образовании : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / Под ред. Б. М. Хрусталева. — Минск : Белорус. нац. тех. ун-т, 2016. — Ч. 2. — С. 17–20.

8. Белый, А. В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. — Москва : Машиностроение, 1991. — 208 с.

9. Сопротивление контактному и усталостному разрушению модифицированных ионами азота хромистых сталей / П. А. Витязь, А. В. Белый, В. А. Кукаренко, Ю. П. Шаркеев // Физическая мезомеханика. — 2004. — Спец. выпуск 7, ч. 2. — С. 149–152.

10. Сверхтвердые оксидные покрытия, получаемые на титане при обработке токами высокой частоты / А. А. Фомин, М. А. Фомина, И. В. Родионов [и др.] // Письма в журнал технической физики. —2015. — Т. 41, вып. 18. — С. 89–95.

11. Григорьев, С. Н. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента / С. Н. Григорьев, М. А. Волосова. — Москва : Янус-К, 2007. — 324 с.

Поступила в редакцию 18.05.2020
Запланирована в номер 01.07.2020

Об авторе:

Глушко Сергей Петрович, доцент кафедры «Системы управления и технологические комплексы» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (РФ, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7087-6572, sputnik_s7@mail.ru.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.78.015:620.1 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-289-294

Контактная разность потенциалов легированной стали после термической обработки



Л. П. Арефьева, А. Г. Сукиязов, Ю. В. Долгачев, Л. С. Шахова
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена актуальному вопросу разработки и применения неразрушающего метода контроля качества поверхностей стальных изделий (метод зонда Кельвина). Цель работы — установление величины контактной разности потенциалов (КРП) стали марки ХВГ после проведения термической обработки.
Материалы и методы. Объектом исследования явилась легированная инструментальная сталь марки ХВГ. Химический состав образцов уточнялся методом оптико-эмиссионного анализа. Для проведения статистической обработки в трех сериях исследовали по три образца. Были выбраны разные режимы термической обработки каждой серии: закалка с низким отпуском, улучшение и нормализация. Торцы образцов шлифовались, затем один из них обрабатывался раствором азотной кислоты. Далее проводилось измерение контактной разности потенциалов, статистическая обработка данных.
Результаты исследования. Полученные данные показывают, что величина КРП образцов стали марки ХВГ после проведения термической обработки изменяется. С увеличением температуры отпуска величина контактной разности потенциалов шлифованной поверхности и твердость снижаются практически линейно. Воздействие кислоты приводит к значительному уменьшению и выравниванию величины контактной разности потенциалов для всех структур. Проведено сравнение контактной разности потенциалов сталей ХВГ и У10. Легирование стали элементами со значениями работы выхода электрона выше, чем у железа, вызывает снижение контактной разности потенциалов между эталоном и образцом. Характер изменения КРП при изменении состава стали сильно зависит от наличия легирующих элементов. Зависимость КРП от дисперсности структуры видна в обоих случаях, однако, для стали ХВГ она более ярко выражена.
Проведены расчеты работы выхода электрона структур мартенсита, троостита и сорбита, полученные в результате термообработки сталей ХВГ и У10.
Обсуждение и заключения. Экспериментально установлена зависимость величины контактной разности потенциалов от структуры, химического и фазового состава, рассчитана работа выхода электрона сталей марок ХВГ и У10. Данный метод более чувствителен к образцам легированной стали, чем к углеродистой. Следует заключить, что измерение контактной разности потенциалов можно использовать как неразрушающий экспресс-метод диагностики для контроля поверхностей, подвергающихся воздействию активных сред или повышенных температур.

Ключевые слова: контактная разность потенциалов, работа выхода электрона, легированная сталь, термическая обработка, метод зонда Кельвина, неразрушающий контроль.

Для цитирования: Контактная разность потенциалов легированной стали после термической обработки / Л. П. Арефьева, А. Г. Сукиязов, Ю. В. Долгачев, Л. С. Шахова // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 289−294. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-289-294



Contact potential difference of alloy steel after heat treatment

L. P. Aref'eva, A. G. Sukiyazov, Yu. V. Dolgachev, L. S. Shakhova
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The paper considers an actual issue of the development and application of a non-destructive method for controlling the quality of surfaces of steel products (Kelvin probe method). The work objective is to establish the magnitude of the contact potential difference (CPD) of steel 107WCR5 after heat treatment.

Materials and Methods. The object of study is alloy tool steel 107WCR5. The chemical composition of the samples was refined through the optical emission analysis method. To carry out the statistical processing, there were three samples in three series. We chose different heat treatment modes for each series, i.e., quenching with low tempering, strengthening and normalization. The end surfaces of the samples were polished and then one of them was treated with a solution of nitric acid. Further, the measurement of the contact potential difference and statistical data processing were carried out.
Results. The data obtained show that the CPD value of steel 107WCR5 samples changes after heat treatment. With an increase in tempering temperature, the contact potential difference of the polished surface and the hardness, decrease almost linearly. Exposure to acid causes a significant decrease and equalization of the contact potential difference for all structures. The contact potential difference of steels 107WCR5 and CT105 is compared. Alloying steel by the elements with the work function values of the electron higher than that of iron causes a decrease in the CPD between the standard and the sample. The CPD behavior under a change in the composition of the steel depends strongly on the presence of alloying elements. The dependence of CPD on the dispersion of the structure is seen in both cases; however, it is more pronounced for 107WCR5 steel. The electron work function of the martensite, troostite, and sorbitol structures obtained as a result of heat treatment of steels 107WCR5 and CT105 is calculated.
Discussion and Conclusions. The dependence of the contact potential difference on the structure, chemical and phase composition was experimentally established; the electron work function of steels 107WCR5 and CT105 was calculated. This technique is more sensitive to alloy steel samples than to carbon steel. It seems possible to conclude that the measurement of the contact potential difference can be used to control surfaces exposed to active media or elevated temperatures as a non-destructive express diagnostic method.

Keywords: contact potential difference, electron work function, alloy steel, heat treatment, Kelvin probe method, nondestructive testing.

For citation: L. P. Aref`eva, A. G. Sukiyazov, Yu. V. Dolgachev, et al. Contact potential difference of alloyed steel after heat treatment. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 289−294. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-289-294

Введение. В обзорной работе [1] подробно описано изменение понятия работы выхода электрона (РВЭ) и понимания ее природы, начиная с открытия в 1895 году Г. Герцем явления фотоэффекта и заканчивая рассмотрением теоретических методов расчета РВЭ. Вначале РВЭ определяли как работу, необходимую для удаления электрона из металла. За последние сто лет это фундаментальное свойство поверхности было измерено практически для всех химических элементов и многих проводящих сплавов. Первоначально РВЭ измеряли как энергию ионизации, хотя это является нестрогим определением, так как энергия ионизации зависит от присутствующих на поверхности примесей, для монокристалла РВЭ зависит от ориентации граней. На сегодняшний день разработаны надежные методы определения РВЭ поли- и монокристаллов [2]. Одним из таких методов является метод зонда Кельвина, который позволяет измерять контактную разность потенциалов поверхностей эталона и исследуемого образца на макроуровне и проводить картирование контактной разности потенциалов (КРП) на микро- и наноуровне [3]. В настоящее время метод зонда Кельвина широко применяется для неразрушающего контроля состояния и качества поверхности [3–7]. Например, в работе [7] предложен метод определения поверхностной энергии сплавов по величине КРП и твердости, получены значения РВЭ сталей марок 30ХГСА, Р18, ШХ15.

Контактная разность потенциалов — это разность между работами выхода электрона двух металлических поверхностей. Работа выхода электрона определяется как разность между электростатическими потенциалами внутри металла ϕ_i и вне металла в определенной точке ϕ_0 и энергией Ферми металла E_F:

$$\varphi = (\phi_i - \phi_0) - E_F = \Delta\phi - E_F = 4\pi P_S - E_F, \qquad (1)$$

где P_S — дипольный момент двойного слоя, приходящийся на единицу площади поверхности. Дипольный момент двойного слоя зависит от химического состава поверхностных слоев, микрошероховатости поверхности, адсорбированных атомов, наличия и плотности дефектов, кристаллографической ориентации поверхности. Энергия Ферми чувствительна к состоянию объема металла, в том числе к его химическому составу.

Контактная разность потенциалов зависит от состояния объема и поверхности металла, и, следовательно, является структурно чувствительной величиной. Структуру и фазовый состав стали можно изменить с помощью термической обработки.

Целью настоящей работы являлось установление величины контактной разности потенциалов стали марки ХВГ после проведения термической обработки.

Материалы и методы. Объектом исследования была выбрана легированная инструментальная сталь марки ХВГ. Методом оптико-эмиссионного анализа был уточнен химический состав исследуемых образцов, который имеет следующие средние значения: 1% C, 1,1 %Cr, 1,4%W, 0,95% Mn, 0,25%Si, 0,35%Ni, 0,3%Mo, 0,3%Cu и менее 0,03% серы и фосфора.

Для достоверности экспериментальных данных и проведения статистической обработки количество образцов в сериях составляло по 3 единицы. Для установления влияния режимов термической обработки на КРП были выбраны три различных режима: закалка с низким отпуском, улучшение, нормализация. Температура закалки первой и второй серий образцов — 820°С. В качестве охлаждающей среды использовалось минеральное масло, что обеспечивало скорость охлаждения выше критической в соответствии с диаграммой распада аустенита стали марки ХВГ. Далее для первой группы образцов проводился низкий отпуск при температуре 180°С и дальнейшее охлаждение на воздухе. Для второй группы образцов — отпуск при температурах 600°С и 400°С. Для третьей группы — нормализация путем нагрева до 820°С и охлаждения на воздухе. Противоположные торцы образцов соответствовали разной технологии подготовки — сторона А после термообработки подвергалась шлифовке, сторона Б, дополнительно к шлифованию, протравливалась 4% растровом азотной кислоты в этиловом спирте.

В целях контроля получаемых структур после термической обработки проводились измерения твердости образцов методом Роквелла.

Измерение КРП проводили методом зонда Кельвина на лабораторном стенде, разработанном в научно-образовательном центре «Материалы» ДГТУ (рис. 1)[1]. Электрод сравнения, принимаемый за эталон, был изготовлен из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, не подвергался никаким внешним воздействиям (облучению, влиянию сильных электрических и магнитных полей, нагреву и охлаждению, взаимодействию с химическими реактивами и т.д.) и использовался во всех измерениях. Образец фиксировался на металлическом столе с помощью струбцины (рис. 1). Поверхность располагалась строго параллельно эталонному электроду. Между струбциной, образцом и металлическим столом обеспечивался электрический контакт.

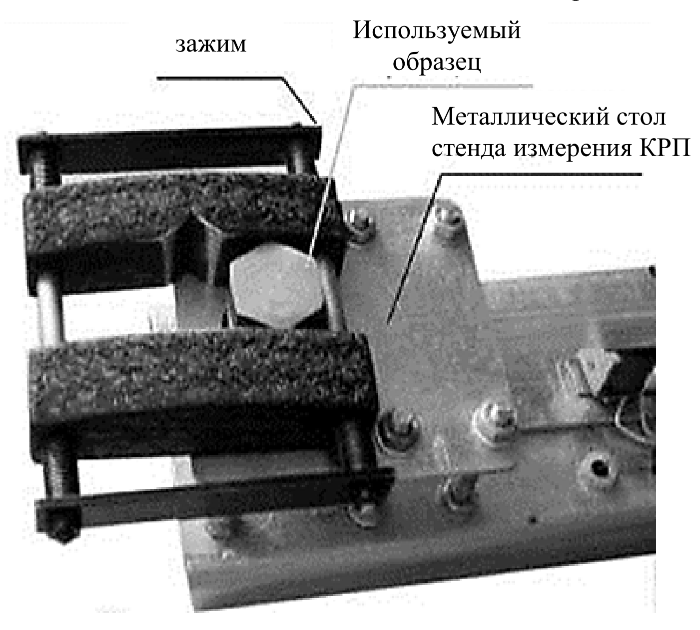


Рис. 1. Образец стали ХВГ, расположенный на металлическом столе измерительного стенда

Результаты исследования. Результаты измерений КРП имеют хорошую воспроизводимость. Статистическая обработка проводилась по методу Стьюдента. Полученные данные показывают, что величина КРП образцов стали марки ХВГ после проведения термической обработки изменяется (рис. 2). В результате нормализации получена структура сорбита (с межпластинчатым расстоянием ~0,4–0,2 мкм) с твердостью 22 HRC, которая имела минимальные значения КРП и твердости. Наибольшие значения твердости и КРП наблюдаются у структуры мартенсита отпуска с карбидами, полученного в результате закалки и низкого отпуска при 180°С [8–10]. С увеличением температуры отпуска величина КРП шлифованной поверхности, как и твердость, снижается почти линейно (рис. 2). После обработки поверхности стали ХВГ 4% раствором азотной кислоты по реакции ионного обмена образуется пленка, состоящая из нитратов железа, хрома и вольфрама.

[1] Стенд для измерения работы выхода электрона с поверхности металлических тел: пат. 177 659 Рос. Федерация МПК H01L 21/00 (2006/01) / А. Г. Сукиязов, В. Б. Зеленцов, С. М. Айзикович, Б. И. Митрин. № 2017139300; заявл.13.11.2017; опубл. 05.03.2018 Бюл. №7. 9с.

Воздействие кислоты приводит к значительному уменьшению средней величины КРП для всех полученных структур, то есть значения КРП становятся примерно одинаковыми (рис. 2).

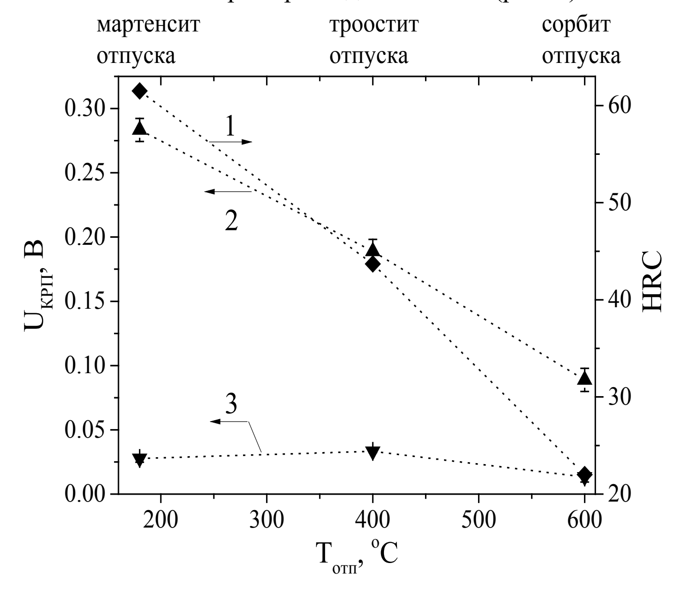


Рис. 2. Влияние температуры отпуска на контактную разность потенциалов стали марки ХВГ:
1 — твердость; 2 — КРП шлифованной поверхности; 3 — КРП поверхности после травления

Как известно, легирующие элементы изменяют не только критические температуры фазовых превращений, но и большинство свойств стали [11–13]. Например, возрастает твердость материала. В связи с этим целесообразно проанализировать влияние легирования на контактную разность потенциалов стали, то есть на величину работы выхода электрона. Данные КРП стали марки ХВГ сравнивались с результатами измерения КРП углеродистой инструментальной стали У10 с таким же содержанием углерода и аналогичным структурным состоянием. Легирование стали элементами, имеющими значения работы выхода электрона выше, чем у железа, приводит к понижению КРП между эталоном и образцом (рис. 3). Исключение составляет структура мартенсита отпуска, у которого происходит (на 0,06 В) повышение величины КРП, по сравнению с величиной КРП мартенсита отпуска стали У10. Также у разных структур легированной стали наблюдаются более резкие отличия значений КРП, чем в случае углеродистой стали. Характер изменения КРП при изменении состава стали сильно зависит от наличия легирующих элементов. Зависимость КРП от дисперсности структуры видна в обоих случаях, однако, для стали ХВГ она более ярко выражена.

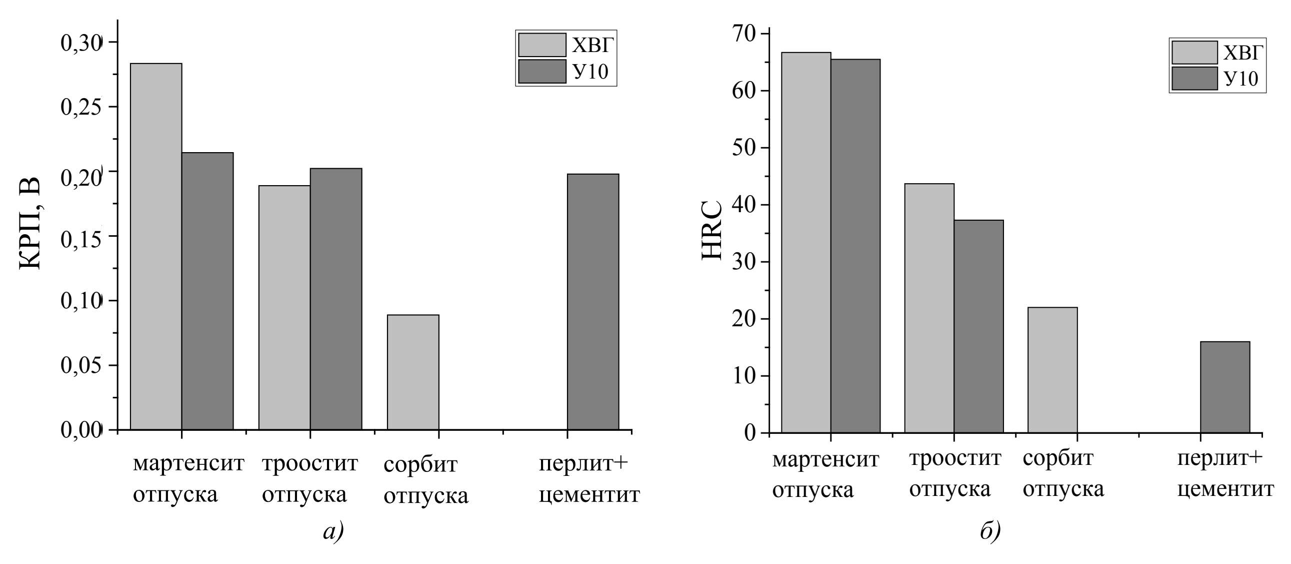


Рис. 3. Гистограмма значений КРП (*а*) и твердость HRC (*б*)
для сталей ХВГ и У10

Согласно справочным данным [14], работа выхода электрона нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т принималась равной 3,67 эВ. Исходя из определения физической величины «контактной разности потенциалов», как разницы между работами выхода двух параллельных поверхностей разных металлов, образующих конденсатор, можно записать выражение для работы выхода электрона исследуемого образца в виде:

$$\varphi = \varphi_{эт} - eU_{КРП}\,. \qquad (2)$$

По выражению (2) проведена оценка величины работы выхода электрона структур мартенсита, троостита и сорбита, полученных в результате термообработки стали марок ХВГ и У10 (рис. 4). Так как величины КРП для всех исследованных структур положительны, то РВЭ этих структур меньше РВЭ эталонного образца. Зависимости величины РВЭ исследуемых образцов от структуры значительно отличаются. Для стали марки У10 изменение величины РВЭ не превышает сотые доли эВ, тогда как для стали марки ХВГ разница величин РВЭ структур сорбита и троостита доходит до 0,1 эВ, т.е. составляет 3% от значения РВЭ троостита. Работа выхода электрона мартенсита отпуска с карбидами стали ХВГ равна 3,45 эВ. Таким образом, можно заключить, что на величину РВЭ оказывают влияние следующие факторы — фазовый состав (разное структурное состояние, полученное при разных режимах термической обработки), химическое состояние (растворение элементов или образование химических соединений на поверхности образца) и дисперсность структуры. Под дисперсностью понимаем разницу в размерах пластинок продуктов отпуска (перлит, сорбит, троостит). Для легированной стали разница между структурами отпуска значительно отражается на величине РВЭ (рис. 4). В то же время для стали У10 эта разница на рис. 4 практически не видна.

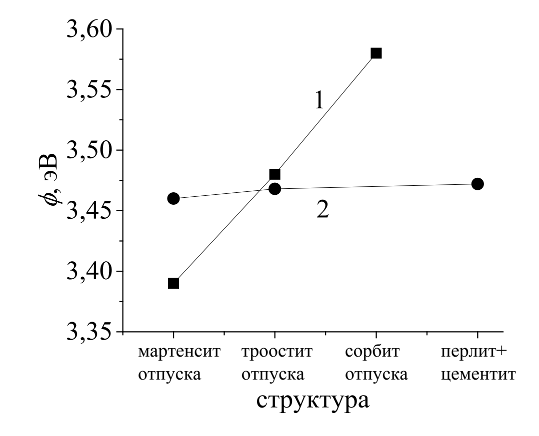


Рис. 4. Зависимость величины работы выхода электрона от фазового состава стали: 1 — сталь марки ХВГ; 2 — сталь марки У10

Обсуждение и заключения. Полученные зависимости показывают корреляцию изменения твердости и величины КРП. Так как КРП всех образцов положительна, то их РВЭ меньше РВЭ используемого эталона. Наибольшей величиной КРП обладает структура мартенсита отпуска. Установлено, что КРП понижается с увеличением температуры отпуска. Добавление легирующих элементов с более высокими значениями работы выхода электрона приводит к уменьшению КРП между исследуемыми образцами со структурами ферритно-цементитных смесей, вторичными карбидами и эталоном. Легирующие элементы значительно увеличивают изменение величин КРП при изменении структурного состояния сплава по сравнению с углеродистой сталью. Экспериментально установлена зависимость величины КРП от структуры, химического и фазового состава сталей. Проведена оценка величины работы выхода электрона стали марок У10 и ХВГ. Из полученных результатов видно, что данный метод более чувствителен к образцам легированной стали, чем к углеродистой. Таким образом можно заключить, что измерение КРП может использоваться как неразрушающий экспресс-метод диагностики при контроле поверхностей, подвергающихся воздействию активных сред или повышенных температур.

Библиографический список

1. Halas, S. 100 years of work function / S. Halas // Materials Science-Poland. — 2006. — Vol. 24, no. 4. — P. 951−968.

2. Вудраф, Д. Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф, Т. Делчар. — Москва : Мир, 1989. — 564 с.

3. Исследование локализации деформации методом зонда Кельвина / Н. А. Шипица, А. Л. Жарин, Д. И. Сарока, А. А. Дмитрович // Физическая мезомеханика. — 2004. — Т. 7, № S1–1. — С. 218–221.

4. Контроль трущейся поверхности методами контактной разности потенциалов / А. Л. Жарин, О. К. Гусев, А. И. Свистун, А. К. Тявловский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2011. — № 5–2. — С. 286–295.

5. Контроль прожогов лопаток компрессора газотурбинного двигателя методом контактной разности потенциалов / И. В. Герасимов, В. С. Олешко, Д. П. Ткаченко, А. П. Кирпичников // Вестник Казанского технологического университета. — 2012. — Т. 15, №17. — С. 146–149.

6. Кукоз, В. Ф. Влияние контактной разности потенциалов на скорость фрикционной обработки поверхностей металлов / В. Ф. Кукоз, Ф. И. Кукоз / Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия : Технические науки. — 2004. — № 1. — С. 107–107.

7. Олешко, В. С. Оперативное определение поверхностной энергии металлических деталей авиационной техники / В. С. Олешко, И. С. Пиговкин // Науковедение : [сайт]. — 2016. — Т. 8, № 3. — URL : http://naukovedenie.ru/PDF/ 131EVN316.pdf

8. Пустовойт, В. Н. Проблемы зарождения при мартенситном превращении в стали / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачёв // Вестник Донского государственного технического университета. — 2013. — Т. 13, № 1–2. — С. 5–24.

9. Пустовойт, В. Н. К вопросу о местах зарождения мартенсита / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2014. — № 23 (150). — С. 110–114.

10. Pustovoit, V. N. Structural identification of the phenomenon of “white zone” / V. N. Pustovoit, Yu. M. Dombrovskii, Yu.V. Dolgachev // Metal Science and Heat Treatment. — 2017. — Vol. 59, no. 1−2. — P. 3−7.

11. Попова, Л. Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: справочник термиста / Л. Е. Попова, А. А. Попов. — Москва : Металлургия. — 1991. — 503 с.

12. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. — Москва : Металлургия, — 1986. — 480 с.

13. Работа выхода электрона сплавов тугоплавких металлов / В. Б. Арзамасов, Э. Е. Смирнова, А. А. Строев [и др.] // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. — 2009. — №1 (7). — С. 102–104.

14. Рухляда, Н. Я. Исследование измерения работы выхода в процессе отжига нержавеющей стали, облученной ионами аргона / Н. Я. Рухляда, Р. К. Вишератин / Вопросы атомной науки и техники. Серия : Ядерно-реакторные константы. — 2014. — № 2. — С. 96–105.

Сдана в редакцию 29.06.2020
Запланирована в номер 31.08.2020

Об авторах:

Арефьева Людмила Павловна, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ResearcherID: J-4075-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2431-6897, Ludmilochka529@mail.ru

Сукиязов Александр Гургенович, профессор кафедры «Радиоэлектроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ScopusID: 6506323992, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6117-0068, pro_suk@mail.ru

Долгачев Юрий Вячиславович, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: B-2328-2016, ScopusID: 55151183800, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8558-1136, yuridol@mail.ru

Шахова Лилия Сергеевна, студент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1). ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9728-9909, shahowa.lilya@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Л. П. Арефьева — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов и анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов. А. Г. Сукиязов — научное руководство, проведение экспериментальных исследований, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. Ю. В. Долгачев — анализ результатов исследования, подготовка текста, корректировка выводов. Л. С. Шахова — проведение пробоподготовки и экспериментальных исследований, доработка текста, оформление текста и графическое представление результатов исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.7.074 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-295-301

Математическая модель формообразования зубчатых изделий объемным инструментом с одним параметром движения



А. А. Силич, Э. М. Юсупова

ФГКВОУ ВО «Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова» Министерства обороны Российской Федерации (г. Тюмень, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена разработке математической модели однопараметрического формообразования зубчатого изделия. В качестве примера рассмотрено формообразование боковой поверхности зубьев колеса передачи Новикова, показан характер и величины изменения погрешности формообразования по высоте зуба колеса. Целью работы являлась разработка математической модели поверхности зубьев изделий, как огибающая производящей поверхности инструмента. Выполнено расчетно-экспериментальное исследование. Полученные математические модели могут использоваться в устройствах с копирами при формообразовании боковой поверхности зубьев колеса передачи Новикова.

В качестве примера рассматривается характер отклонения профиля зубьев колеса передачи Новикова с исходным контуром ДЛЗ 0,7–0,15.

Материалы и методы. При построении модели и исследовании ее характеристик используется математический аппарат теории зацепления, методика расчета цилиндрических передач — авторские разработки Силича А. А. В работе предложены новые математические модели уравнений боковой поверхности зубьев изделия, образованного с помощью инструмента, осевой профиль которого совпадает с исходным контуром. В рассматриваемой модели инструмент совершает движение вдоль оси изделия при вращении последнего вокруг своей оси. В ходе исследования проведено численное моделирование для определения величины погрешности формообразования профиля изделия с помощью инструмента.

Результаты исследования. Разработаны новые математические модели и программное обеспечение для численного моделирования формообразования зубчатого изделия с помощью инструмента с одним независимым параметром движения. Также разработан алгоритм определения величины погрешности отклонения реального профиля от номинального для зуба колеса передачи Новикова. Приведены решения для точного воспроизведения профиля зуба.

Обсуждение и заключения. Параметрический способ аналитического описания поверхности, использованный в работе, упрощает вычисления перемещений режущего инструмента в задачах числового программного управления. Решение задачи синтеза технологии обработки поверхности деталей на металлорежущих станках предусматривает разработку описания всего процесса формообразования и требует представления поверхности детали в виде математической модели. Полученные результаты могут быть использованы в процессе создания отделочных методов обработки зубьев, при повышении качества зубчатых колес и передач, а также производительности обработки.

Ключевые слова: зубчатые изделия, математическая модель, однопараметрическое формообразование, погрешность формообразования.

Для цитирования: Силич, А. А. Математическая модель формообразования зубчатых изделий объемным инструментом с одним параметром движения / А. А. Силич, Э. М. Юсупова // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 295−301. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-295-301

Mathematical model of shaping toothed products using volumetric tool with one motion parameter

A. A. Silich, Eh. M. Yusupova
Tyumen Higher Military Engineering Command School (Tyumen, Russian Federation)

Introduction. The development of a mathematical model of one-parameter shaping of a toothed product is considered. As an example, shaping of the side surface of the teeth of the Novikov gearing is studied; the mode and magnitude of the change in the shaping error heightwise the wheel tooth are shown. The work objective was to develop a mathematical model of the surface of the product teeth as a generating surface envelope of the tool. A computational and experimental study is carried out. The mathematical models obtained can be used in devices with copiers when shaping the side surface of the teeth of the Novikov gear. As an example, we consider the deviation behavior of the teeth profile of the Novikov gear with the original profile of DLZ 0.7-0.15

Materials and Methods. When building the model and studying its characteristics, the mathematical tools of the gearing theory, calculation procedure for cylindrical gears (A.A. Silich's author development) were used. The paper proposes new mathematical models of the equations of the lateral surface of the gear teeth formed with a tool whose axial profile coincides with the original one. In the model under consideration, the tool moves along the axis of the product while the latter rotates on its axis. In the course of the study, numerical modeling was carried out to determine the error value in shaping the product profile using the tool.

Results. New mathematical models and software have been developed for numerical simulation of the shaping of a toothed product using a tool with one independent motion parameter. An algorithm has also been developed to determine the deviation error of the real profile from the nominal one for the tooth of the Novikov gear. Solutions to accurately reproduce the tooth profile are provided.

Discussion and Conclusions. The parametric method of analytical description of the surface used in the work simplifies the calculation of the cutting tool displacements in the problems of numerical control. Solving the problem of synthesizing the technology of workpiece surface treatment on metal-cutting machines provides the development of a description of the entire shaping process and requires the representation of the workpiece surface in the form of a mathematical model. The results obtained can be used under creating finishing methods for processing teeth when improving the quality of gear wheels and gear drives, as well as production efficiency.

Keywords: toothed products, mathematical model, one-parameter shaping, error of shaping.

For citation: A.A. Silich, E.M. Yusupova**.** Mathematical model of shaping toothed products using volumetric tool with one motion parameter. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 295−301. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-295-301

Введение. Рассматривается процесс формообразования боковой поверхности зуба колеса передачи Новикова с использованием следующего алгоритма:

— описывается производящая поверхность инструмента в системе координат этого инструмента;

— реальная поверхность зубьев колеса формируется как огибающая производящей поверхности инструмента при движении последнего относительно колеса с независимыми параметрами;

— проводятся численные исследования по отклонению реальной поверхности от теоретической и анализ полученных результатов.

В соответствии с ГОСТ 13 755–81 для режущего инструмента стандарт устанавливает нормативный ряд модулей и определенные соотношения между размерами элементов зуба. Эти соотношения определяются для зубчатых колес параметрами исходной рейки через параметры ее нормального сечения — исходный контур. В качестве инструмента в работе рассмотрен шлифовальный круг.

Относительное движение звеньев передачи или инструмента и заготовки при обработке можно описать одним или двумя независимыми параметрами. Поверхность зубьев первого звена является огибающей однопараметрического или двухпараметрического семейства поверхностей второго звена. Очень часто поверхность зубьев изделий в процессе его обработки формируется как огибающая производящей поверхности инструмента при движении последнего относительно изделия с одним независимым параметром. В большинстве случаев в качестве такого параметра выбирают угол поворота изделия.

Теоретическая поверхность зубьев колеса в процессе его финишной обработки абразивным инструментом формируется как огибающая производящей поверхности инструмента при движении последнего относительно колеса с независимыми параметрами. Теоретической поверхностью, в соответствии с ГОСТ 16 530–83, является каждая из двух поверхностей (боковые поверхности двух зубьев), обеспечивающие при их взаимодействии заданное передаточное отношение.

В связи с вышеизложенным была поставлена задача по определению уравнений боковой поверхности зубьев изделия. Поверхности образованы с помощью инструмента, осевой профиль которого совпадает с исходным контуром. При этом инструмент совершает движение вдоль оси изделия, а колеса — согласованное вращение вокруг своей оси. Так как вращение изделия и перемещение инструмента связаны между собой аналитической зависимостью, то в качестве независимого параметра формообразования зубчатого изделия выбран угол поворота изделия $\varphi_к$.

Материалы и методы. Для получения уравнения номинальной производящей поверхности инструмента в работе была использована система координат, жестко связанная с рейкой. В качестве исходного контура принято нормальное сечение рейки. На рис. 1 в качестве примера показан обобщенный исходный контур, взятый из исследовательских работ [1, 2]. Контур составлен из дуг окружностей, которые могут плавно сопрягаться между собой или пересекаться, что зависит от типа исходного контура.

На рис. 1 цифрами в кружках показаны номера участков (i=1,2,3,…7). Границы участков выделены крупными точками. Кроме этого, на рис. 1 приняты следующие обозначения: S_i $(X_i;Y_i;Z_i)$ системы координат, связанные с i-тым участком исходного контура. Начало координат такой системы совмещено с центром окружности участка, а направление осей совпадает с направлением осей системы координат рейки S_p $(X_p;Y_p;Z_p)$.

Решение задачи разбито на два этапа. На первом этапе строится математическая модель объемного инструмента в виде тела вращения (например, дискового шлифовального круга или дисковой фрезы). На втором этапе с помощью инструмента формообразуется зубчатое изделие с одним независимым параметром движения.

Математическая модель инструмента

Получим теоретическую производящую поверхность, привязав поверхность инструмента с системой координат S_u $(X_u;Y_u;Z_u)$, направив ось Z_u вдоль оси вращения инструмент. Ось X_u расположим таким образом, чтобы она проходила через расчетную точку, в качестве которой принимаем точку касания инструмента и изделия в начальный момент времени. Ось Y_u направлена так, чтобы все оси составляли правую декартовую систему координат. С исходным контуром связана собственная система координат $S_p(X_p;Y_p)$, оси которой расположены так, чтобы ось Z_p совпадала с делительной прямой исходного контура, а ось X_p, была ей перпендикулярна и направлена в сторону оси инструмента.

Для формообразования производящей поверхности инструмента применяются устройства, работающие с помощью копира, либо устройства, воспроизводящие траекторию движения правящего алмаза или заточного инструмента с помощью системы ЧПУ. Для любого из этих случаев математическое описание производящей поверхности инструмента будет однотипным[1, 2] [3].

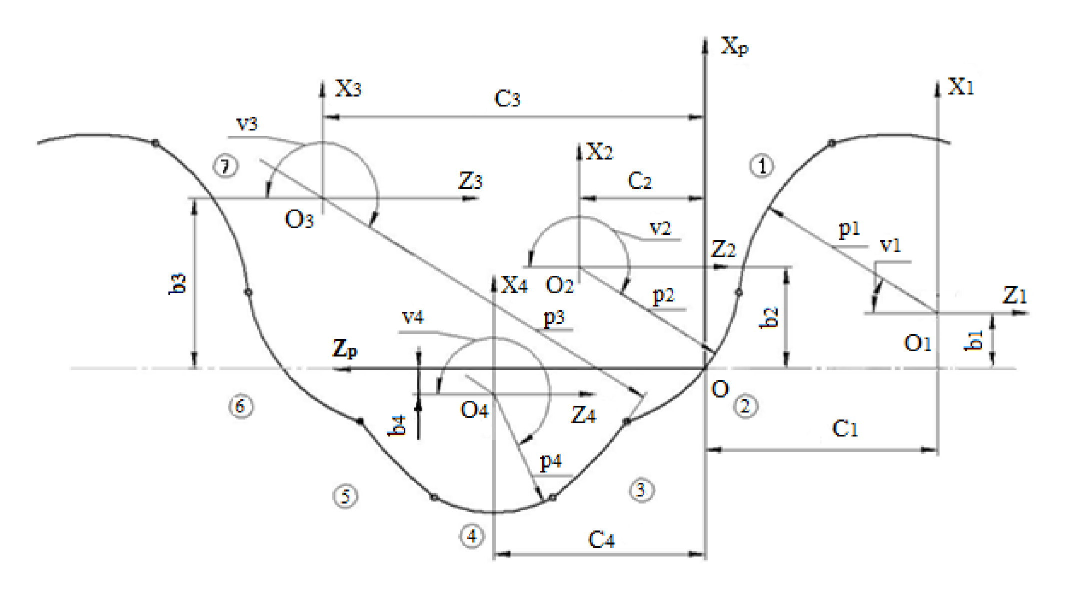


Рис. 1. Исходный контур ДЛЗ-0,7-0,15

На рис. 2 показано взаимное расположение инструмента 1, исходного контура *2,* копира *3*, схемы

[1] Кривошейкин, А. В., Нурмухамедов Л. Х., Перелыгин С. В. Математическое моделирование в приборных системах : учеб. пособие. СПб. 2019. 108 с.

[2] Зюзьков, В. М. Математическая логика и теория алгоритмов : учеб. пособие. Т. 2015. 236 с.

правильного устройства и принятые системы координат, связанные с копиром и инструментом.

Математическую модель производящей поверхности инструмента будем рассматривать как след движения контура копира при его вращении вокруг оси Z_u с угловым параметром движения φ_u.

В системе координат S_p уравнение профиля копира, включающие участки 1, 2 и 3 можно записать следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} X_p &= \rho_i \cdot \sin v_i + b_i; \\ Z_p &= \rho_i \cdot \cos v_i + c_i; \end{aligned}\right\}, \tag{1}$$

где обозначение величин взяты из работ [4–6]: ρ_i — радиус кривизны i-го участка нормального профиля зуба рейки; v_i — криволинейная координата производящей поверхности рейки, начало отсчета которой идет по часовой стрелке от оси Z_p; c_i — аппликата положения центра кривизны соответствующего участка в системе S_p; b_i — абсцисса центра кривизны соответствующего участка в системе координат S_p.

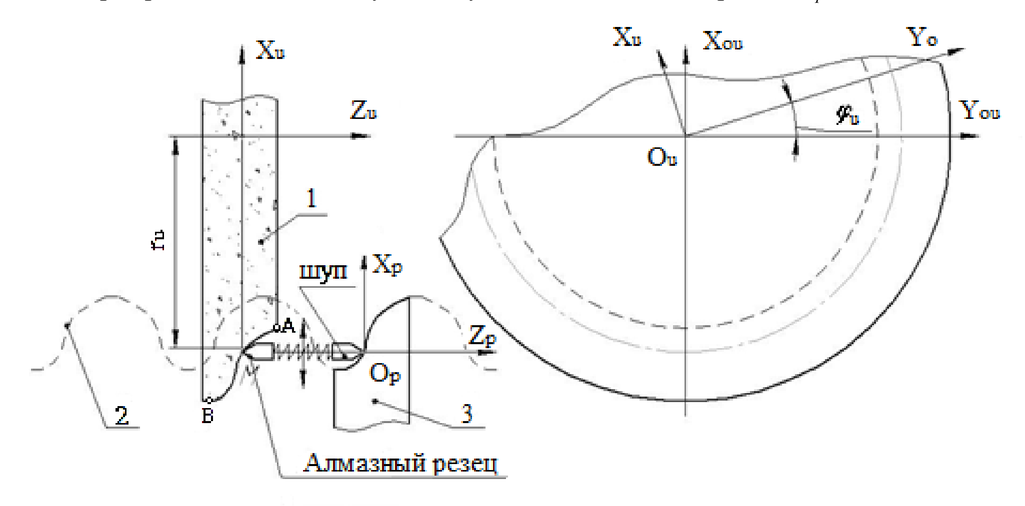


Рис. 2. Схема формообразования инструмента с принятой системой координат

Кроме этого на рис. 2 обозначен расчетный радиус инструмента r_u.

Воспользовавшись выбранными системами координат, введенными обозначениями и методикой формообразования поверхностей[3], получим уравнение производящей поверхности инструмента в проекции на оси координат:

$$\tilde{r_и} = \left\{\begin{aligned} X_{ui} &= cos\,\varphi_{ui} \cdot (\rho_i \cdot sin\,v_i + b_i - r_u); \\ Y_{ui} &= -\,sin\,\varphi_{ui} \cdot (\rho_i \cdot sin\,v_i + b_i - r_u); \\ Z_{ui} &= -\rho_i \cdot cos\,v_i - c_i. \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Для получения математической модели изделия понадобится уравнение нормали к производящей поверхности инструмента. Поэтому, используя известную методику [3] и опуская промежуточные преобразование, запишем уравнения орта нормали к производящей поверхности в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} e_{xui} &= -\cos\varphi_u \cdot \sin v_i; \\ e_{yui} &= \sin\varphi_u \cdot \sin v_i\,; \\ e_{zui} &= \cos v_i. \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

Математическая модель изделия

Геометро-кинематическая схема формообразования боковой поверхности зуба изделия с помощью инструмента с соответствующими системами координат показана на рис. 3. Участки производящей поверхности инструмента заданы в системе координат $S_u\,(X_u;\ Y_u;\ Z_u)$, жестко связанной с инструментом. Система координат $S_к\,(X_к;Y_к;Z_к)$ жестко связана с обрабатываемым изделием (например, зубчатым колесом). Неподвижные вспомогательные системы координат колеса S_{ou} $(X_{ou};Y_{ou};Z_{ou})$ и инструмента $S_{ок}$ $(X_{ок};Y_{ок};Z_{ок})$, связанные со стойкой.

В качестве независимого параметра относительного движения при обработке изделия примем величину $\varphi_к$, численно равную углу поворота колеса вокруг оси $Z_к$. Перемещение инструмента вдоль оси изделия

[3] Раннев, Г. Г., Тарасенко А. П. Интеллектуальные средства измерений : учеб. пособие. М. 2016. 280 с.

обозначено как S_o. Угол наклона линии зуба изделия — $\beta_к$. Межосевое расстояние — $a=r_u+r_k+X_k$.

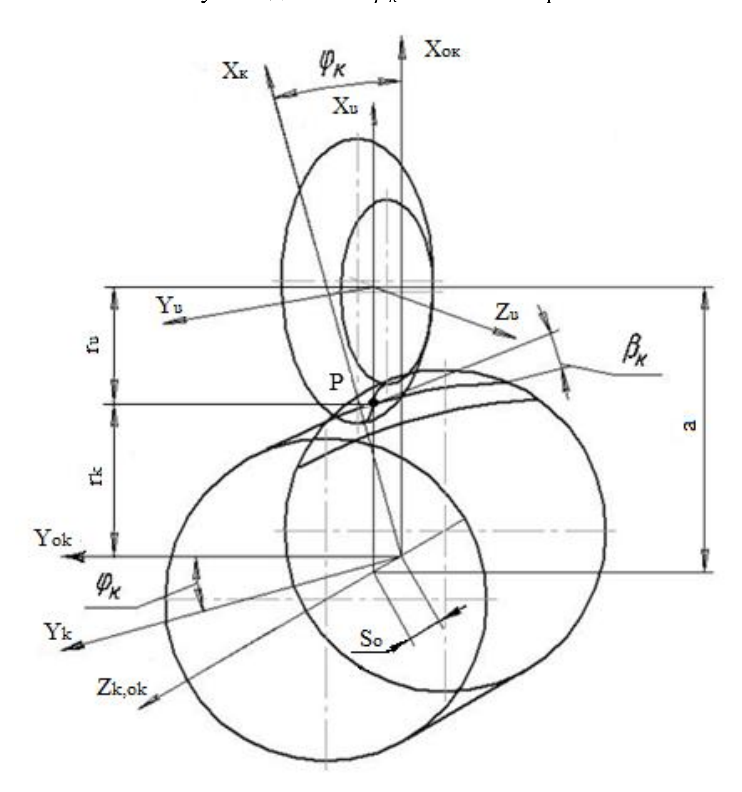


Рис. 3. Геометро-кинематическая схема формообразования профиля зуба изделия инструментом

Реальная поверхность зуба изделия, как огибающая однопараметрического семейства производящей поверхности инструмента, определяется следующим уравнениями [3]:

$$\left.\begin{aligned} \tilde{r}_к = \tilde{A}_{кui} \cdot \tilde{r}_u \qquad & а) \\ \bar{e}_{ui} \cdot \bar{V}_{ui} = 0 \qquad & б) \end{aligned}\right\}, \tag{4}$$

где $\tilde{r}_u$ — матрица-столбец, составленная из проекций производящей поверхности инструмента, записанной в системе координат S_u; $\tilde{A}_{кui}$ — матрица перехода от системы координат S_u к системе координат $S_к$; $\bar{V}_{ui}$ — аналог вектора относительной скорости по параметру φ_u; $\bar{e}_{ui}$ — орт нормали к производящей поверхности инструмента, проекции которого на оси координат X_u, Y_u, Z_u представлены уравнениями (3).

Матрицу перехода $\tilde{A}_{кui}$ найдем воспользовавшись методикой изложенной в работах [3, 7]. Опуская промежуточные преобразования, данную матрицу представим в следующем виде:

$$\tilde{A}_{кui} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_к & \sin\beta_к \cdot \sin\varphi_к & -\cos\beta_к \cdot \sin\varphi_к & a \cdot \cos\varphi_{ui} \\ -\sin\varphi_к & \sin\beta_к \cdot \cos\varphi_к & -\cos\beta_к \cdot \cos\varphi_к & -a \cdot \sin\varphi_{ui} \\ 0 & \cos\beta_к & 1 & -S_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$S_o = \frac{\varphi_к \cdot r_к}{\tan\beta_к} = \frac{\varphi_к \cdot m \cdot z_к}{2 \cdot \sin\beta_к}$$

$$a = r_к + X_к + r_u = \frac{m \cdot z_к}{2 \cdot \cos\beta_к} + X_к + r_u.$$

Воспользовавшись методикой однопараметрического формообразования поверхностей [3], принятыми системами координат и геометро-кинематической схемой формообразования (рис. 3), а также опуская промежуточные преобразования, уравнение реальных поверхностей зубьев изделия можно записать так:

$$\left.\begin{aligned} x_{кi} = \cos\varphi_к \cdot \cos\varphi_u \cdot \sin\beta_к \cdot \sin\varphi_к \cdot \sin\varphi_u \cdot (\rho_i \cdot \sin\upsilon_i + b_i - r_u) + \\ + \cos\beta_к \cdot \sin\varphi_u \cdot (\rho_i \cdot \cos\upsilon_i + c_i) \\ y_{кi} = \sin\varphi_к \cdot \cos\varphi_u \cdot \sin\varphi_u \cdot \sin\beta_к \cdot \cos\varphi_к \cdot (\rho_i \cdot \sin\upsilon_i + b_i - r_u) + \\ + \cos\beta_к \cdot \cos\varphi_к \cdot (\rho_i \cdot \cos\upsilon_i + c_i) \\ z_{кi} = -\cos\beta_к \cdot \sin\varphi_u \cdot (\rho_i \cdot \sin\upsilon_i + b_i - r_u) - \\ - \sin\beta_к \cdot (\rho_i \cdot \cos\upsilon_i + c_i) - \varphi_к \cdot r_к \cdot ctg\,\beta_к \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

Используя методику получения уравнения зацепления (4 б)[4], окончательно запишем его в следующем виде:

[4] Раннев Г. Г., Тарасенко А. П. Интеллектуальные средства измерений. 280 с.

$$\cos\beta_{к}\cdot[\sin\varphi_{ui}\cdot\sin\upsilon_i\cdot(c_i - r_k\cdot\sin\beta_{к} + X_k\cdot\tan\beta_{к} + r_u\cdot\tan\beta_{к}) - \\ -\cos\upsilon_i\cdot(r_k + X_k)] = 0 \quad (7)$$

где $X_к$ — смещения исходного контура.

Результаты исследования

Для определения величины погрешности формообразования профиля изделия с помощью инструмента был использован следующий алгоритм:

1. Реальная и номинальная поверхности зубьев изделия записывались в одной системе координат. В качестве номинальной поверхности зубьев изделий были взяты уравнения боковой поверхности зубьев колеса, образованных с помощью рейки[5] [3].

2. Задавалось текущее значение независимого параметра υ_j, где j=1, 2, 3−n — текущий номер точки на профиле зуба колеса.

3. Принимая $Z_{кi}=const$, определялось значение второго независимого параметра $\varphi_{кj}$ номинального профиля изделия.

4. Через текущую точку υ_j профиля зуба изделия проводилась окружность, определялось её пересечение с реальным профилем зуба изделия.

5. В качестве погрешности формообразования принималось расстояние по хорде между точками номинального и реального профиля, расположенных на одной и той же окружности.

Разработанный алгоритм по определению погрешности формообразования был реализован в виде программы в программной среде MathCAD.

В качестве примера на рис. 4 показан характер изменения реального профиля, по сравнению с номинальным, и направление отсчета погрешности Δ_{ij} формообразования профиля зуба колеса передачи Новикова.

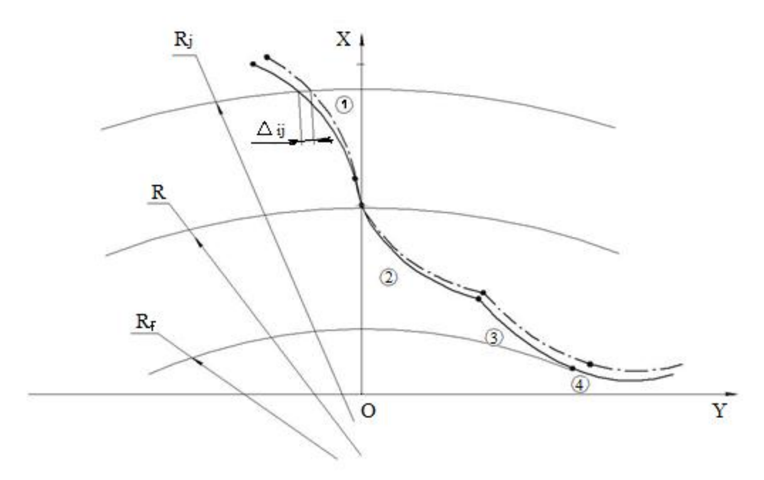


Рис. 4. Характер отклонения профиля зубьев колеса передачи Новикова:

——— — номинальный профиль; — · — — реальный профиль

Реальные значения погрешностей Δ_{ij} приведены на рис. 5 для зубчатого колеса передачи Новикова с исходным контуром ДЛЗ 0,7–0,15 и следующими геометрическими параметрами: модуль зацепления m_n=5, число зубьев колеса $z_к$=50, угол наклона линии зуба $\beta_к$=20º, смещения исходного контура $X_к$=0.

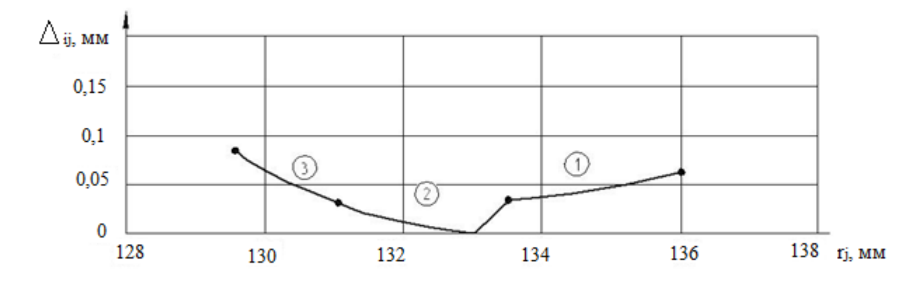


Рис. 5. Отклонение реального профиля от номинального для зуба колеса передачи Новикова

[5] Зюзьков В. М. Математическая логика и теория алгоритмов. 236 с.

Как видно из графика на рис. 5, минимальное значение отклонения находятся в районе делительного радиуса колеса, а максимальные значения наблюдаются на головке и в основании зуба колеса. Максимальные величины формообразования профиля зависят от вида исходного контура, числа зубьев, угла наклона линии зуба, а также от диаметральных размеров инструмента.

Обсуждение и заключения. Разработана математическая модель формообразования зубчатого изделия с помощью инструмента с одним независимым параметром движения.

1. Численные исследования показывают, что по данной схеме обработки невозможно теоретически точно воспроизвести контур зуба изделия, если производящая поверхность инструмента образована по профилю исходного контура обрабатываемого изделия.

2. Максимальные искажения профиля наблюдаются на головке и ножке зуба колеса (у диаметра выступов и впадин) и их величина тем больше, чем выше исходный контур, больше модуль зацепления, меньше число зубьев и больше угол наклона зуба.

3. Для точного воспроизведения профиля зуба необходима корректировка копира, по которому осуществляется правка и заточка инструмента.

Библиографический список

1. Силич, А. А. Передачи Новикова. Геометрический расчет цилиндрических передач Новикова / А. А. Силич. — Тюмень : Изд–во ТИУ, 2016. — 79 с.

2. Силич, А. А. Цилиндрические передачи Новикова. Методика геометрического расчета / А. А. Силич. — Дюссельдорф : Lambert Academic Publishing, 2013. — 90 с.

3. Ломова, О. С. Математическое моделирование структурных изменений в поверхностях заготовок при тепловых возмущениях в процессе шлифования / О. С. Ломова // Омский научный вестник. — 2013. — №2(120). — С. 95–98.

4. Силич, А. А. Технология обработки зубчатых колес цилиндрических передач Новикова / А. А. Силич. — Тюмень : Изд. ТюмГНГУ. — 2007. — 162 с.

5. Litvin, F. L. Computerized Generation and Simulation of Meshing and Contact of New Type of Novikov-Wildhaber Helical Gears / F. L. Litvin, P.-H. Feng, S. A. Lagutin // NASA / Contractor Report-2000-209415 / ARL-CR-428, 2000. — 55 p.

6. Litvin, F. L. Development of Gear Technology and Theory of Gearing / NASA Reference Publication 1406, ARL-TR-1500, 1998.

7. Литвин, Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф. Л. Литвин. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Наука, 1968. — С. 584.

Сдана в редакцию 08.06.2020
Запланирована в номер 10.08.2020

Об авторах:

Силич Александр Анатольевич, доцент кафедры «Военно-технических дисциплин» ФГКВО ВО «Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А.И. Прошлякова» Министерства обороны Российской Федерации, (625000, РФ, г. Тюмень, ул. Л. Толстого, 1, доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1114-4726, silichaas@gmail.com

Юсупова Эльвира Мирхатовна, преподаватель кафедры «Естественно-научные и общепрофессиональные дисциплины» ФГКВО ВО «Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А.И. Прошлякова» Министерства обороны Российской Федерации (625000, ул. Л. Толстого, 1, г. Тюмень), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0463-1067 , jusupovaem@tyuiu.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Силич — научное руководство, анализ результатов исследований, формирование основной концепции. Э. М. Юсупова — формирование цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Advanced Engineering Research 2020. Т. 20, № 3. С. 302−310. ISSN 2687-1653

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 622.271.002.5 (06) https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-302-310

Ковшовые рабочие органы с конвейерным днищем: систематика и конструктивные особенности

Ю. М. Ляшенко[1], Е. А. Ревякина[2], А. Ю. Ляшенко[1]


[1] Шахтинский автодорожный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова» (г. Шахты, Российская Федерация)

[2] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов на Дону, Российская Федерация)

Введение. Рассматривается создание новых типов ковшовых рабочих органов экскаваторов путем синтеза технических решений по улучшению транспортирующих функций днища. Эти решения основаны на снижении сопротивлений и энергоемкости при внедрении и зачерпывании за счет перехода от трения скольжения к трению качения во время перемещения горной массы по днищу ковша.

Материалы и методы. Анализ процессов погрузки и транспортировки сыпучих материалов с использованием существующих погрузочных средств выявил конструктивные недостатки, влияющие на эффективность их работы. Поиск перспективных конструктивных схем погрузочных органов осуществлялся на основе накопленного опыта и изучения морфологических особенностей существующего оборудования. Выполнены комбинаторный анализ возможных сочетаний элементов с разнообразным их качественным составом, взаимным расположением, наложенными связями и синтез новых технических решений погрузочно-транспортных модулей.

Результаты исследования. Результатами реализации морфологического синтеза явились систематизация и разработка конструкций ковшовых рабочих органов с днищем в виде роликовой поверхности и замкнутой ленты, а также с приводным механизмом конвейерного типа. Использование роликов в качестве опорной поверхности погруженного горного массива приводит к уменьшению сил трения и снижению энергоемкости рабочего процесса. Кроме того, вращающиеся ролики обеспечивают равномерное истирание рабочей поверхности, что значительно увеличивает время до выхода из строя оборудования и повышает эффективность технологического процесса. Рабочие органы с приводным механизмом позволяют активизировать взаимодействие днища конвейера в виде замкнутой ленты с горной массой и, как следствие, ускорить процесс заполнения емкости ковша.

Обсуждение и заключения. Ковшовые рабочие органы, описанные в работе, выгодно отличаются от существующих аналогов тем, что они обеспечивают сокращение времени внедрения, черпания и выгрузки, снижение удельной энергоемкости, увеличение наполнения ковша, что, в конечном счете, способствует повышению производительности. Некоторое повышение конструктивной сложности и стоимости рабочего органа приводят к дополнительным капитальным затратам, которые окупаются в течение двух-четырех месяцев.

Ключевые слова: ковшовые рабочие органы, процесс погрузки, операции рабочего цикла, выемочно-погрузочные машины, конвейерное днище, роликовая поверхность, механическая передача, гидроцилиндр, шток гидроцилиндра, трение.

Для цитирования: Ляшенко, Ю. М. Ковшовые рабочие органы с конвейерным днищем: систематика и конструктивные особенности / Ю. М. Ляшенко, Е. А. Ревякина, А. Ю. Ляшенко // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 302−310. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-302-310

Bucket working bodies with conveyor bottom: systematics and design features

Yu. M. Lyashenko[1], E. A. Revyakina[2], A.Yu. Lyashenko[3]
[1,3] Shakhty Institute, Branch of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (Shakhty, Russian Federation)
[2] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The creation of new types of bucket working bodies of excavators through synthesizing technical solutions to improve the transporting functions of the bottom is considered. These solutions are based on reducing the resistance and energy consumption under digging-in and scooping due to the transition from sliding friction to rolling friction during the movement of the rock mass along the bottom of the bucket.
Materials and Methods. Analysis of the bulk materials handling processes using existing loading appliances identified design flaws that affect the efficiency of their operation. Advanced design diagrams of loading bodies were searched on the basis of the accumulated experience and the study of the morphological features of the existing equipment. Combinatorial analysis of possible combinations of elements with their various qualitative compositions, mutual arrangement, imposed links, and synthesis of new technical solutions for loading and transportation modules are carried out.
Results. The results of the morphological synthesis implementation were the systematization and development of designs of bucket working bodies with a bottom in the form of a roller surface and a closed belt, as well as with a conveyor-type drive mechanism. The application of rollers as a supporting surface of a loaded rock mass causes a decrease in friction forces and in the power capacity of the work process. In addition, rotating rollers provide uniform abrasion of the working surface, which increases significantly the time to the equipment breakdown and increases the process efficiency. Working bodies with a drive mechanism make it possible to activate the interaction of the conveyor bottom in the form of a closed belt with the rock mass and, as a result, to accelerate the process of filling the bucket container.
Discussion and Conclusions. The bucket working bodies described in the paper compare favorably with existing analogues in that they provide a reduction in the time to digging-in, scooping and unloading, a decrease in specific energy consumption, an increase in bucket filling, which ultimately contributes to an increase in productivity. A slight increase in the structural complexity and cost of the working body causes additional capital costs, which are paid back within two to four months.

Keywords*:* bucket working bodies, loading process, working cycle operations, extraction-and-loading machines, conveyor bottom, roller surface, mechanical transmission, hydraulic cylinder, hydraulic cylinder rod, friction.

For citation: Yu. M. Lyashenko, E. A. Revyakina, A.Yu. Lyashenko. Bucket working bodies with conveyor bottom: systematics and design features. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 302‒310. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-302-310

Введение. Технический уровень горнотранспортного оборудования для добычи полезных ископаемых открытым способом определяется конструктивным совершенством как машины в целом, так и её ковшового рабочего органа[1,2,3]. Повысить технико-эксплуатационные показатели оборудования можно путем использования, прежде всего, рабочих органов рациональных конструкций и параметров.

Анализ средств механизации погрузки скальных грунтов с помощью эксплуатируемых в настоящее время выемочно-погрузочных машин (экскаваторов), выявил факторы, влияющие на эффективность их работы[4]. На рис. 1 представлен ковш широко применяемой конструкции с днищем в виде гладкой поверхности.

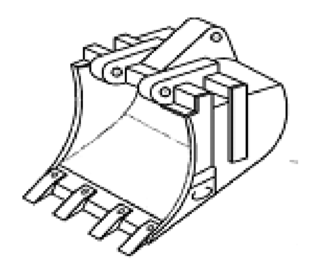


Рис. 1. Ковшовый рабочий орган с днищем в виде гладкой поверхности

[1] Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров : учеб. для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М., 2003. 606 с.
[2] Дроздова Л. Г., Курбатова О. А Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт : учеб. пособие. Владивосток, 2007. С. 48–56.
[3] Направления и результаты исследований по созданию проходческого оборудования нового технического уровня / Г. Ш. Хазанович [и др.] // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. Тамбов, 2013. С. 148–152.
[4] Хазанович Г. Ш., Ляшенко Ю. М. Никитин Е. В. Методика эксперимента в исследованиях процессов погрузки и транспортировки кусковых пород : учеб.-метод. Пособие. Новочеркасск, 2003. 150 с.

Установлено, что конструктивное усовершенствование ковшового рабочего органа ведется, главным образом, по пути снижения сопротивлений внедрению ковша в штабель [1]. Целью настоящей работы является систематизация разработанных авторами новых технических решений рабочих органов, в частности, с конвейерным днищем, анализ их конструктивных особенностей и улучшенных рабочих качеств, т. е. рассмотрение тенденций развития данного класса оборудования. Основные задачи работы:

— обоснование принципиальных подходов к изменению конструкций элементов ковшового рабочего органа;

— определение целесообразности применения функционально-структурного анализа для выбора направлений совершенствования конструкции ковша;

— разработка классификационных признаков, характеризующих ковши экскаваторов с уменьшенным сопротивлением внедрению;

— предварительная качественная оценка новых технических решений.

Материалы и методы. Согласно результатам графоаналитического и физического моделирования системы «ковш — штабель горной массы» установлено, что сопротивление внедрению ковшового рабочего органа в штабель существенно зависит от коэффициента трения погружаемого материала по поверхностям ковша [2, 3]. При синтезе обладающих конструктивной новизной технических решений ковшовых рабочих органов решена задача снижения коэффициента трения скальных грунтов о днище рабочих органов путем перехода от трения скольжения к трению качения [4].

Создание образцов новых типов рабочих органов — сложная, многоэтапная задача. Первым этапом определения перспективных конструктивных схем ковшовых рабочих органов явилось изучение накопленного опыта и установление морфологических признаков существующего оборудования (рис. 2).

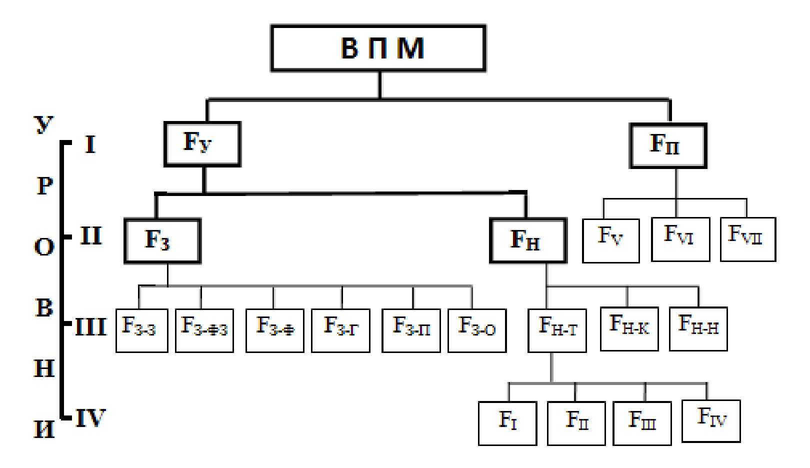


Рис. 2. Функциональная модель выемочно-погрузочной машины

Составленная функциональная модель выемочно-погрузочной машины включает следующую совокупность действий: $F_у$ — убрать горную массу; $F_п$ — обеспечить перемещение в образованном пространстве; $F_з$ — зачерпнуть отделенную от массива горную массу; $F_{з\text{-}з}$ — сформировать объем захвата; $F_{з\text{-}фз}$ — обеспечить функционирование органа формирования объема захвата; $F_{з\text{-}ф}$ — обслужить забой по фронту; $F_{з\text{-}г}$ — обслужить забой в глубину; $F_{з\text{-}п}$ — переместить элемент формирования объема захвата к месту освобождения от порции материала; $F_{з\text{-}о}$ — обеспечить освобождение элемента формирования объема захвата от порции материала; $F_н$ — накопить и перегрузить зачерпнутую горную массу; $F_{н\text{-}т}$ — обеспечить транспортирование (перемещение) горной массы; $F_{н\text{-}к}$ — обеспечить сохранение контакта с последующим транспортным средством; $F_{н\text{-}н}$ — обеспечить накопление горной массы; F_I — удерживать горную массу в процессе транспортирования (перемещения); F_{II} — приложить к горной массе воздействующее усилие; F_{III} — передать воздействующее усилие от привода к исполнительным элементам; F_{IV} — переместить несущий элемент с отделенной от массива горной массой; F_V — воспринимать напорные усилия и закрепить положение функциональных элементов системы; F_{VI} — преобразовать подводимую к приводу энергию в изменение кинематического состояния системы; F_{VII} — объединить функциональные элементы системы для совместной работы.

Предлагаемая дифференциация функциональных признаков позволяет выйти на элементный уровень структурообразования отдельных механизмов выемочно-погрузочных машин. Невозможность дальнейшего дробления основных функций (макрофункций) на подчиненные (микрофункции) без перехода от функции к предметной форме их исполнения явилась сигналом к завершению функционального анализа.

С учетом составленной функциональной модели выемочно-погрузочной машины разработана

морфологическая таблица, с помощью которой сформированы структурно-морфологические признаки технического решения, обладающего конструктивной новизной [4] (рис. 3).

Результаты исследования. Результатом практической реализации морфологического синтеза явилась разработанная конструкция ковша с днищем в виде конвейера [5]. Применение замкнутой ленты в качестве грузонесущего органа и опорной поверхности погружаемой горной массы ведет к исключению просыпания и заклинивания погружаемого материала. Такое исполнение характеризуется низким коэффициентом трения горной массы о днище в виде замкнутой ленты, опирающейся на ролики. Следовательно, нужно ожидать снижения энергоемкости рабочего процесса, что обеспечит увеличение производительности и надежности ковшового рабочего органа.

Представления об эффективности оснащения роликовыми элементами рабочих органов при погрузке скальных грунтов получили дальнейшее развитие в обладающей новизной конструкции рабочего органа погрузочно-транспортного модуля с цикловым исполнительным механизмом. Предлагаемый погрузочно-транспортный модуль, снабженный замкнутой лентой, отличается от существующих аналогов повышенной скоростью перемещения горной массы, он обеспечивает непрерывность погрузки материала при цикличной работе рабочего органа. Все это способствует повышению производительности и эффективности рабочего процесса при исключении возможности просыпания и заклинивания частиц между роликами. Увеличить эффективность ковшового рабочего органа позволяет также оснащение приводом ведущего ролика в конвейерном днище. Это решение обеспечивает сокращение времени операций внедрения, зачерпывания и разгрузки, увеличение наполнения ковша и, следовательно, способствует повышению производительности [6].

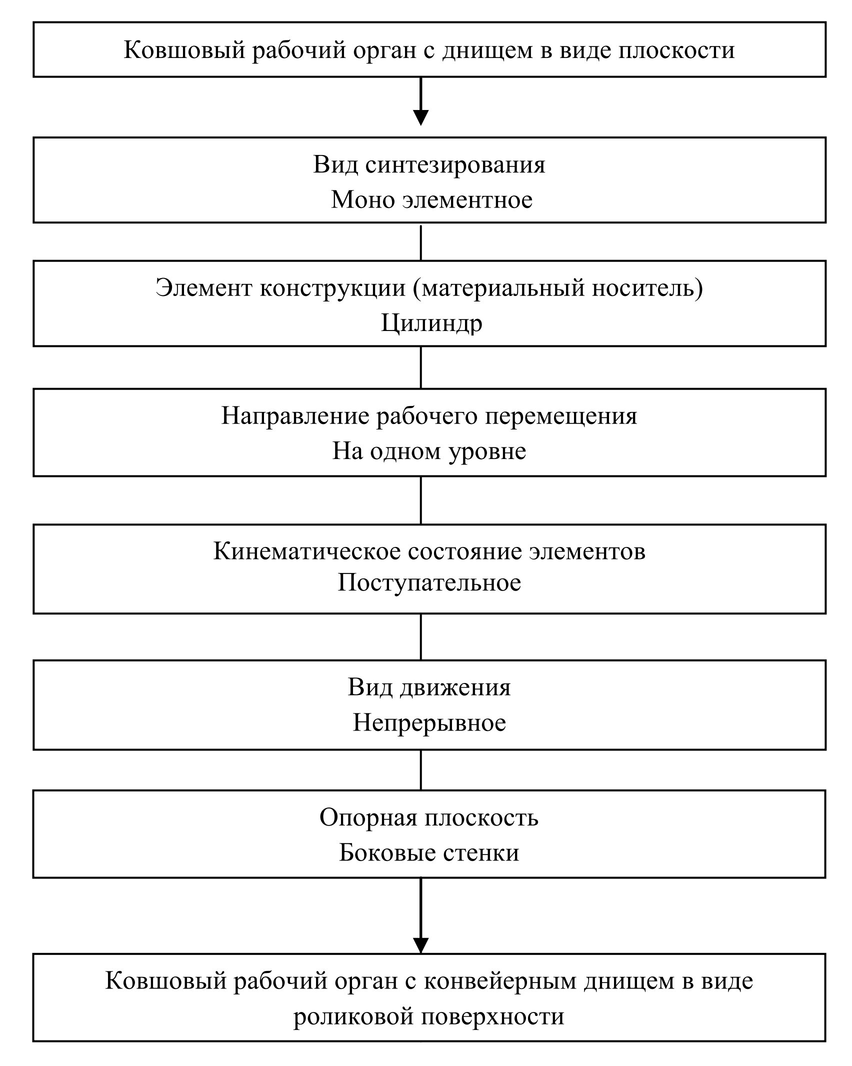


Рис. 3. Формирование структурно-морфологических признаков обладающего конструктивной новизной технического решения

Разработанные на приведенных принципах модели ковшей с конвейерным днищем образуют новую конструктивно-технологическую группу погрузочных органов, которые могут использоваться на экскаваторах, ковшовых погрузчиках и другом погрузочно-транспортном оборудовании. Ниже эти технические решения представлены совокупностью двух групп конструкций, характеризующихся днищем в виде роликовой

поверхности и в виде замкнутой ленты (рис. 4) [7]. В свою очередь, конструктивно модели с замкнутой лентой делятся на бесприводные и с механизмом привода ленты, который может быть выполнен от электродвигателя с механической трансмиссий и с помощью различных вариантов силовых гидроцилиндров.

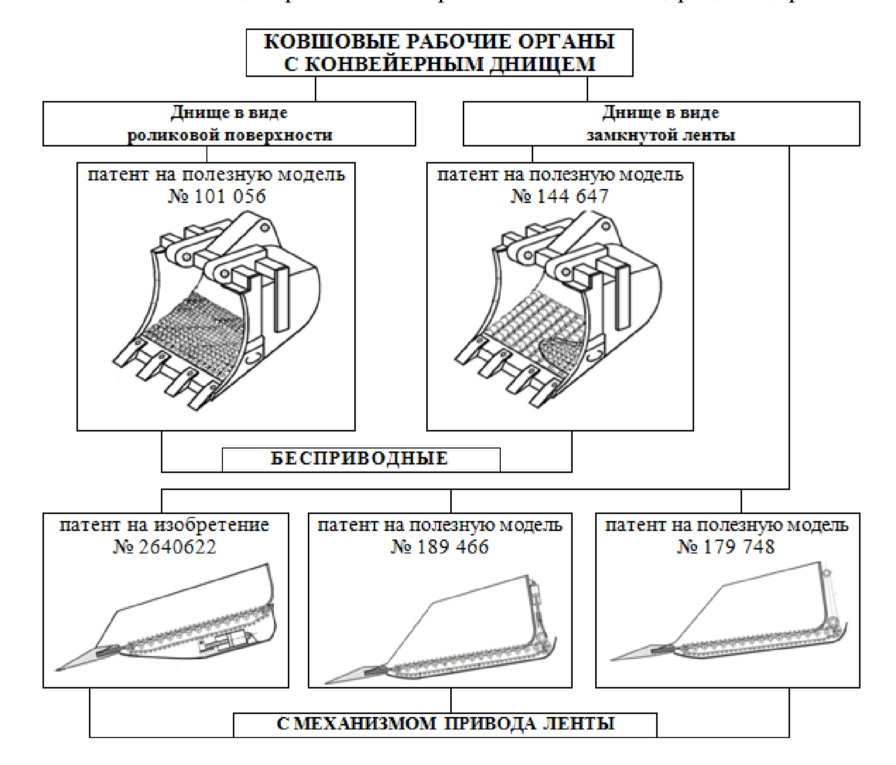


Рис. 4. Систематика ковшовых рабочих органов с конвейерным днищем

Рассмотрим конструктивные особенности бесприводных ковшовых рабочих органов с конвейерным днищем в виде роликовой поверхности, в виде замкнутой ленты, а также ковшовых рабочих органов с механизмом привода ленты конвейерного днища.

Ковшовый рабочий орган с конвейерным днищем в виде роликовой поверхности[5]**.** Согласно предлагаемой конструкции ковшового рабочего органа (рис. 5), днище 3 выполняется в виде поверхности, состоящей из совокупности роликов 4, которые устанавливаются с возможностью вращения вокруг осей 5, закрепленных на боковых стенках 2. Перед началом работы, когда процесс рыхления горных пород в карьере закончен, ковшовый рабочий орган находится перед штабелем кусковой горной массы в положении, показанном на рис. 5, б. Наполнение емкости 1 происходит при ее принудительном перемещении в направлении штабеля. При этом режущая кромка и зубья днища 3 срезают часть материала штабеля, расположенного на поверхности забоя. Горная масса в разрыхленном состоянии скользит по роликам 4 и поступает в емкость 1. Ролики 4 под напором горной массы вращаются относительно осей 5, снижая сопротивление ее перемещению относительно днища 3 и способствуя более эффективному наполнению емкости 1.

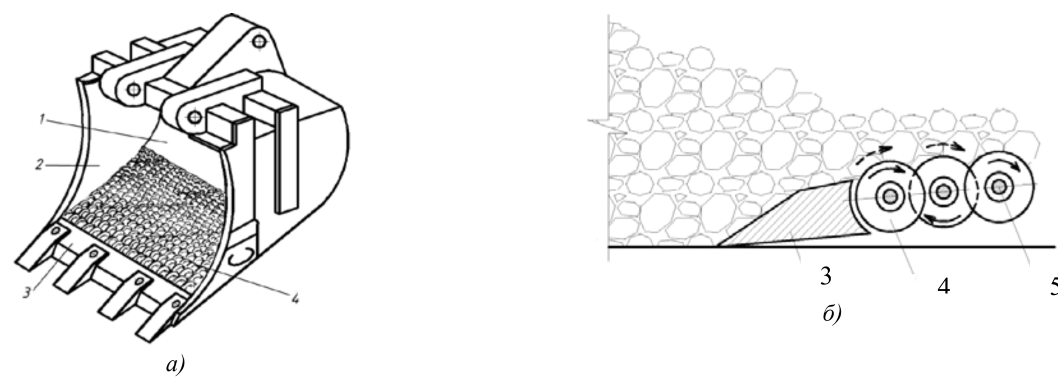


Рис. 5. Конструкция ковшового рабочего органа с конвейерным днищем в виде роликовой поверхности (*а*) и его положение перед штабелем кусковой горной массы (*б*):
1 — емкость ковша; 2 — боковые стенки; 3 — днище; 4 — совокупность роликов; 5 — ось вращения

[5] Ляшенко Ю. М., Ревякина Е. А., Ляшенко А. Ю. : патент 101056 Рос. Федерация : E02F 3/40 / № 2010128718/03 ; заявл. 09.07.2010 ; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

Перемещение горной массы к месту разгрузки осуществляется в емкости 1. Разгрузка емкости происходит при ее наклоне вследствие перемещения горной массы под действием сил тяжести. При этом скольжение горной массы в обратном направлении по вращающимся в том же направлении роликам 4 способствует сокращению времени разгрузки. Использование роликов в качестве опорной поверхности погружаемой горной массы приводит к уменьшению рабочих нагрузок и снижению энергоемкости процесса. Кроме того, вращающиеся ролики обеспечивают равномерное истирание рабочей поверхности, что значительно снижает риск выхода из строя оборудования и повышает эффективность процесса.

Ковшовый рабочий орган с днищем в виде замкнутой ленты (рис. 6)[6]. Особенность такой конструкции заключается в том, что конвейерное днище 3 выполняется в виде замкнутой ленты 6, состоящей из пластин 7, шарнирно соединенных между собой пальцами 8. Лента опирается на ролики 4 и огибает последние. Ролики выступают в качестве направляющей трассы при движении верхней ветви полотна пластин 7. Под давлением ленты 6, взаимодействующей с горной массой, ролики 4 вращаются относительно осей 5, закрепленных на боковых стенках 2. Лента 6 при этом перемещается по роликам 4. Горная масса по ленте поступает в ёмкость 1. Применение замкнутой ленты в качестве грузонесущего органа и опорной поверхности горной массы исключает просыпание и заклинивание погружаемого материала.

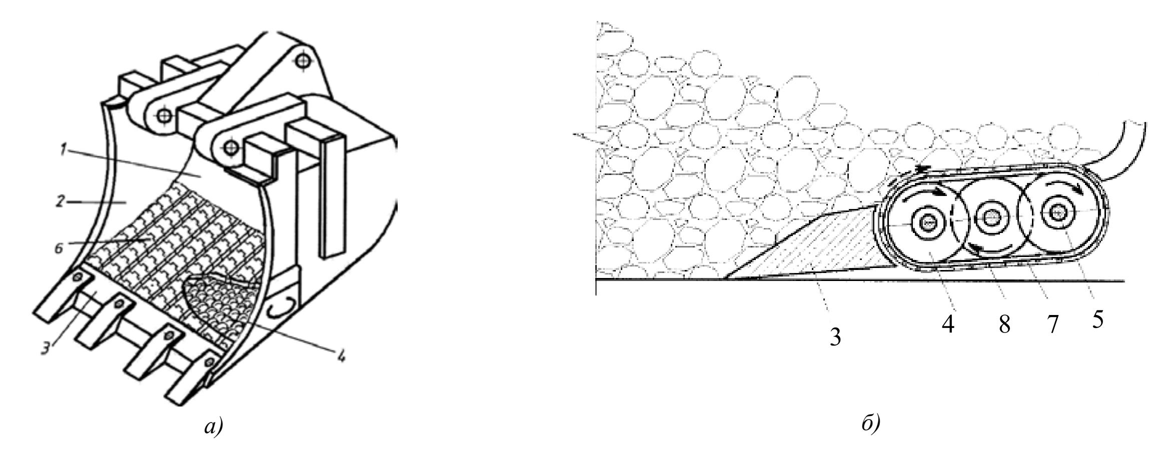


Рис. 6. Ковшовый рабочий орган с конвейерным днищем в виде замкнутой ленты (*а*) и его положение перед штабелем кусковой горной массы (*б*): 1 — емкость ковша; 2 — боковые стенки; 3 — днище; 4 — ролики; 5 — ось вращения; 6 — лента; 7 — пластины; 8 — пальцы

Ковшовый рабочий орган с конвейерным днищем в виде замкнутой ленты, связанной с двигателем механической передачей[7]**.** Такая конструкция по сравнению с предыдущими способна в еще большей степени активизировать взаимодействие конвейерного днища с горной массой и, как следствие, ускорить процесс наполнения ковша (рис. 7). Возможные варианты привода описаны в рассмотренных ниже технических решениях.

Здесь конвейерное днище 2 выполнено в виде замкнутой ленты 3, огибающей ролики 4, оси вращения которых закреплены на боковых стенках 1. Один из роликов 5 выполняется приводным и оснащается механической передачей 6, связанной с двигателем 7, для перемещения замкнутой ленты,

Перемещение горной массы на ленте 3, приводимой в движение вращающимся приводным роликом 5 через механическую передачу 6 от двигателя 8, способствует более эффективному наполнению ёмкости и сокращает время операции. Таким образом, предлагаемый рабочий орган выгодно отличается от существующих аналогов тем, что обеспечивает сокращение времени операций внедрения, черпания и выгрузки, а при внедрении в штабель и зачерпывании увеличивает наполняемость и, следовательно, способствует повышению производительности.

[6] Ковшовый рабочий орган / Ю. М. Ляшенко [и др.] : патент 144647 Рос. Федерация : 6 E02 F3/40 / № 2014108406/03 ; заявл. 04.03.2014 ; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.
[7] Комплекс карьерного оборудования / Е. А. Ревякина [и др.] : патент 2640622 Рос. Федерация : E21C 47/00; B65G 65/02 / № 2016145713 ; заявл. 23.11.2016 ; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1.

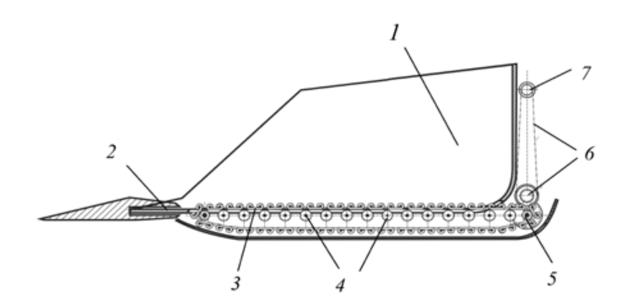


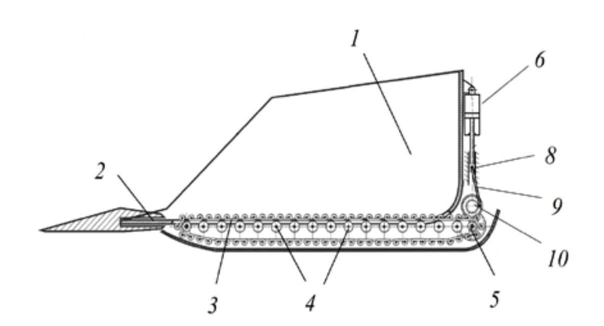
Рис. 7. Ковшовый рабочий орган с конвейерным днищем в виде замкнутой ленты, связанной с двигателем механической передачей: 1 — боковая стенка; 2 — днище; 3 — замкнутая лента; 4 — ролики; 5 — ведущий (приводной) ролик; 6 — механическая передача; 7 — двигатель

Ковшовый рабочий орган с конвейерным днищем в виде замкнутой ленты, связанной передаточными механизмами с приводом из двух гидроцилиндров[8]. Схема такого рабочего органа приведена на рис. 8. Его конвейерное днище 2 выполнено в виде замкнутой ленты 3, огибающей ролики 4, оси вращения которых закреплены на боковых стенках 1. Привод замкнутой ленты состоит из двух гидроцилиндров 6 и 7 с передаточными механизмами в виде установленных в направляющие ползунов 8, шатунов 9 и кривошипов 10. Шатуны 9 шарнирно связаны с ползунами 8, а кривошипы 10 жестко крепятся на оси ведущего ролика 5 при взаимно перпендикулярном смещении.

Оснащение ковшового рабочего органа приводом, состоящим из двух гидроцилиндров с передаточными механизмами указанной конструкции, обеспечивает вращательные движения ведущего ролика. Взаимное смещение точек крепления кривошипов обеспечивает выход гидроцилиндров из мертвых точек в заданном направлении вращения.

С помощью подачи рабочей жидкости в штоковую полость гидроцилиндра 6 обеспечивается движение его штока и передаточных механизмов, состоящих из установленных в направляющие ползунов 8, кривошипов 9 и шатунов 10. Таким образом приводится во вращение приводной ролик 5, чем обеспечивается перемещение ленты 3. При этом поршень гидроцилиндра 7 выводится из крайнего положения, после чего в его поршневую полость подается жидкость, чем обеспечивается одновременная работа гидроцилиндров 6 и 7.

Наполнение ковша происходит в период его принудительного перемещения в направлении штабеля. При этом режущая кромка и зубья днища 2 срезают часть материала штабеля, расположенного на поверхности забоя. Горная масса в разрыхленном состоянии входит во взаимодействие с лентой 3 и перемещается последней к днищу 2, заполняя ковшовый рабочий орган. Цикл завершается возвратом ковшового рабочего органа в исходное положение и его подготовкой к новому рабочему движению и заполнению.



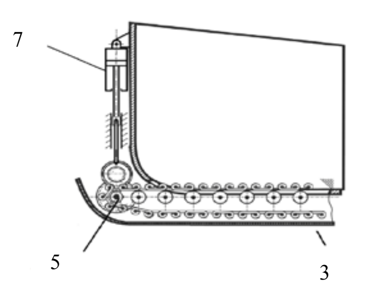


Рис. 8. Ковшовый рабочий орган с конвейерным днищем в виде замкнутой ленты, связанной передаточными механизмами с приводом из двух гидроцилиндров: 1 — боковая стенка; 2 — конвейерное днище; 3 — лента; 4 — поддерживающие ролики; 5 — ведущий ролик; 6, 7 — гидроцилиндры; 8 —ползуны; 9 — шатуны; 10 — кривошипы

Конструктивное исполнение механизма привода ленты в виде вращающегося ролика, приводящегося во вращение двумя гидроцилиндрами с передаточными механизмами, позволяет использовать ковшовые рабочие органы с конвейерным днищем на гидравлических экскаваторах, играющих ключевую роль в механизации выемочно-погрузочных работ на карьерах. Таких экскаваторов насчитывается более 60 % от общей численности.

[8] Ревякина Е. А., Ляшенко Ю. М., Сергеев В. В. : патент 179748 Рос. Федерация : E02F 3/40 / № 2017144003 ; заявл. 15.12.2017 ; опубл. 23.05.2018, Бюл. № 15.

Ковшовый рабочий орган с конвейерным днищем в виде замкнутой ленты, связанной с приводными гидроцилиндрами через стопорные фиксаторы[9]. Схема рабочего органа приведена на рис. 9. В данной конструкции привод замкнутой ленты 1 ковшового рабочего органа с конвейерным днищем состоит из двух гидроцилиндров 4 с установленными на штоках 5 подпружиненными фиксаторами 6, которые входят в зацепление с лентой 1 под действием пружины 7 при прямом ходе и свободно перемещаются при обратном.

В процессе погрузки в гидроцилиндр 4 подается рабочая жидкость. Шток 5 гидроцилиндра выдвигается, фиксатор 6 под действием пружины 7 входит в зацепление с лентой 1 и приводит ее в движение. Лента, двигаясь по роликам 2, осуществляет перемещение находящейся на ней горной массы. Непрерывность процесса транспортирования горной массы обеспечивается последовательной работой 2-х гидроцилиндров 4. Такой механизм привода конвейерной ленты упрощает конструкцию ковшового рабочего органа, повышает надежность привода, сохраняя положительный эффект рассмотренного выше привода ленты в виде вращающегося ролика, получающего вращение от двух гидроцилиндров с передаточными механизмами.

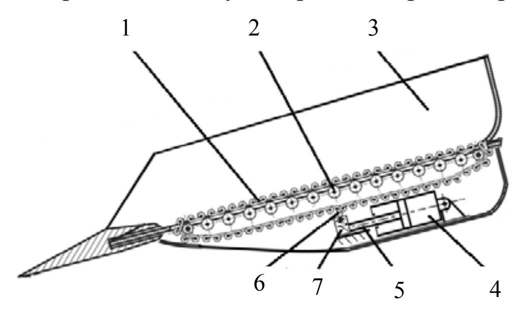


Рис. 9. Ковшовый рабочий орган с конвейерным днищем в виде замкнутой ленты, связанной с приводными гидроцилиндрами через стопорные фиксаторы: 1 — замкнутая лента; 2 — ролики; 3 — боковые стенки; 4 — гидроцилиндр; 5 — шток гидроцилиндра; 6 — фиксатор; 7 — пружина

Обсуждение и заключения. Ковшовые рабочие органы с конвейерным днищем позволяют существенно повысить технический уровень эксплуатируемых экскаваторов, способствуют снижению энергоёмкости погрузки. Предварительный анализ показывает, что в сравнении с традиционными погрузочными органами экскаваторов, имеющими днище с гладкой поверхностью, предлагаемые технические решения имеют следующие преимущества:

- снижение сопротивления внедрению;
- повышение коэффициента наполнения ковша;
- уменьшение удельной энергоемкости процесса;
- увеличение результирующей технической производительности.

Эти преимущества будут более существенно проявляться с увеличением вместимости ковша экскаватора. Определенное конструктивное усложнение погрузочного органа не может существенно сказываться на стоимости экскаватора, предполагаемые дополнительные капитальные затраты окупаются в течение двух-четырех месяцев.

В основу комплексной экспертной оценки полученных в ходе морфологического синтеза вариантов технических решений положен метод расстановки приоритетов [8, 9]. Расчет комплексного приоритета ковшовых рабочих органов с конвейерным днищем и погрузочных модулей с транспортирующим днищем, позволил признать их перспективными при репрезентативности экспертной группы 0,81.

Библиографический список

1. Хазанович, Г. Ш. Моделирование рабочих процессов как основа для выбора рациональных вариантов проходческих погрузочно-транспортных модулей / Г. Ш. Хазанович, Г. В. Лукьянова // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2005. — № 58. — С. 112–117. — URL : https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=41290655 (дата обращения: 29.08.2020).

2. Ляшенко, Ю. М. Методические подходы к моделированию системы «сыпучее тело — рабочий элемент» в исследованиях процесса погрузки горных пород / Ю. М. Ляшенко, Е. А. Ревякина // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 3 (137). — С. 15–20.

3. Моделирование рабочих процессов погрузочно-транспортных модулей с учетом случайного характера внешних воздействий / Г. Ш. Хазанович, Г. В. Лукьянова, Е. А. Ревякина, А. В. Отроков. — Шахты : Изд-во Южн.-Рос. гос. ун-та эконом. и серв., 2010. — 177 с.

[9] Ревякина Е. А., Ляшенко Ю. М. Сергеев В. В. Ковшовый рабочий орган : патент 189466 Рос. Федерация : E02F 3/40 / № 2019106773 ; заявл. 12.03.2019 ; опубл. 23.05.2019, Бюл. № 15.

4. Лускань, О. А. Влияние режимных параметров качания рамы импульсного роликового конвейера на процесс транспортирования штучных грузов / О. А. Лускань // Мир транспорта и технологических машин. — 2011. — № 1(32). — С. 48–63.

5. Lyashenko, Yu. M. Application of the laws of mechanics of granulated solids in studies to loader bucket interaction with bulk material stack / Yu. M. Lyashenko, D. N. Shurygin, E. A. Revyakina // Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering. In: Procedia Engineering.— 2017. — P. 1388-1394.

6. Евстратов, В. А. Исследования физической модели ковша экскаватора с роликовым днищем / В. А. Евстратов, А. Ю. Ляшенко // Строительные и дорожные машины. — 2013. — № 1. — С. 2–7.

7. Ляшенко, Ю. М. Погрузочные органы с роликовой рабочей поверхностью погрузочно-транспортных комплексов карьеров нерудных материалов / Ю. М. Ляшенко, Е. А. Ревякина, А. Ю. Ляшенко // Мир транспорта и технологических машин. — 2014. — Вып. 3(46). — С. 60–71.

8. Моисеева, Н. К. Функционально-стоимостный анализ в машиностроении / Н. К. Моисеева. — Москва : Машиностроение, 1987. — 210 с.

9. Кузнецов, С. Исследование процедур функционально-стоимостного анализа систем / С. Кузнецов. — Москва : LAP Lambert Academic Publishing, 2018. — 100 с.

Сдана в редакцию 16.03.2020
Запланирована в номер 11.05.2020

Об авторах:

Юрий Михайлович Ляшенко, профессор кафедры «Транспортная безопасность и управление дорожной инфраструктурой» Шахтинского автодорожного института (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им М. И. Платова, (346500, РФ, г. Шахты, Ростовской обл., пл. Ленина, 1), доктор технических наук, профессор, Scopus ID: 6603581379, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6553-0163, lumdtn@yandex.ru

Елена Александровна Ревякина, доцент кафедры «Кибербезопасность информационных систем» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, Scopus ID: 57197834319, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1577-2671, revyelena@yandex.ru

Алена Юрьевна Ляшенко, ассистент кафедры «Транспортная безопасность и управление дорожной инфраструктурой» Шахтинского автодорожного института (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им.М. И. Платова, (346500, РФ, г. Шахты, Ростовской области, пл. Ленина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2896-8043, alyona_lyashenko@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ю. М. Ляшенко — научное руководство, формирование основной концепции, целей и задач исследования. Е. А. Ревякина — проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. А. Ю. Ляшенко — анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 004.771 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-311-316

Моделирование информационного обеспечения для оптимизации логистических задач в сфере транспорта с использованием программируемого имитатора контейнера-трансформера



А. А. Короткий[1], Д. А. Яковлева[2], А. А. Масленников[2], И. В. Головко[2]
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерации)
[2]ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», (г. Новочеркасск, Российская Федерации)

Введение. Описана структура транспортной логистической системы перевозки контейнеров-трансформеров в урбанизированной среде для оптимизации производственных издержек с элементами интеллектуальной городской мобильности, а также имитационное программное обеспечение для моделирования и проверки разрабатываемой системы. Представлены основные принципы взаимодействия между элементами системы с помощью моделирования поведения контейнеров и перевозчиков. Создано программное обеспечение, обеспечивающее моделирование работы логистической инфраструктуры для контейнеров-трансформеров с использованием технологии беспроводной связи и «Интернета вещей», а также реализованы сервисы для быстрого обмена информацией между участниками (объектами и субъектами) этого процесса.
Материалы и методы. Раскрывается общий способ организации сети с веб-сервером и мобильным клиентом, а также основной принцип взаимодействия между сервером и клиентом. Определены основы разработки имитатора, предусмотренного для моделирования всех возможных состояний контейнера-трансформера.
Результаты исследования. Создана общая архитектура системы и имитатор для отладки и тестирования программного обеспечения при организации единого пространства по контролю и оптимизации грузоперевозок с использованием «умных» контейнеров-трансформеров при оказании транспортных услуг населению и юридическим лицам в урбанизированной среде.
Обсуждения и заключения. Разработанный имитатор в составе информационной системы позволяет ускорить создание, отладку и тестирование программного обеспечения для решения логистических проблем в сфере транспорта.

Ключевые слова: транспортная логистика, контейнер-трансформер, веб-сервер, клиент, имитатор, транспорт, оптимизация маршрутов.

Для цитирования: Короткий, А. А. Моделирование информационного обеспечения для оптимизации логистических задач в сфере транспорта с использованием программируемого имитатора контейнера-трансформера / А. А. Короткий, Д. А. Яковлева, А. А. Масленников [и др.] // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, №3. — С. 311−316. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-311-316



Modeling of information support to optimize logistics tasks in transport sector using a programmable container transformer simulator

A. A. Korotkii[1], D. A. Yakovleva[2], A. A. Maslennikov[2], I. V. Golovko[2]
[1]Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2]Platov South-Russian State Polytechnic University (Novocherkassk, Russian Federation)

Introduction. The structure of the transport logistics system for the transportation of container transformers in an urbanized environment to optimize production costs with elements of intelligent urban mobility, as well as the simulation software for modeling and testing the developed system, are described. The basic principles of the interaction between elements of the system are presented through the behavioral modeling of containers and carriers.

Software is created to simulate the operation of the logistics infrastructure for transformer containers using wireless technology and the Internet of Things; and services for the rapid information exchange between participants (objects and subjects) of this process are implemented.
Materials and Methods. A general method of organizing a network with a web server and a mobile client, as well as the basic principle of interaction between the server and the client, is described. The basics of developing a simulator designed to simulate all possible states of a container transformer are specified.
Results. A common system architecture and a simulator are created for the software debugging and testing under the organization of a single space to monitor and optimize cargo transportation using "smart" container transformers while providing transport services to the population and legal entities in an urban environment.
Discussion and Conclusions. The developed simulator as part of the information system provides speeding up the creation, debugging and testing of the software for solving logistics problems in the transport sector.

Keywords: transport logistics, container transformer, web server, client, simulator, transport, route optimization.

For citation: A. A. Korotkii, D. A. Yakovleva, A. A. Maslennikov, et al. Modeling of information support to optimize logistics tasks in transport sector using a programmable container transformer simulator. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 311−316. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-311-316

Введение. Существует логистическая проблема, связанная с перевозкой грузовых контейнеров с пустой тарой, что влечет дополнительные расходы на топливо и трудовые ресурсы, загруженность дорог и, как следствие, нагрузку на экологическую среду.

Для решения описанной логистической проблемы по перевозке грузов, используют контейнеры-трансформеры «SmartBoxCity», их оснащают технологией беспроводной связи и «Интернета вещей»[1]. Центральным элементом создаваемого продукта является трансформирующийся в рабочее состояние контейнер, оборудованный информационной системой удалённого администрирования и сценарного управления. Предназначен он для крупных логистических компаний. Контейнер-трансформер позволяет штабелировать в одном транспортном средстве несколько пустых контейнеров, что экономит затраты на логистику, поскольку конкретный объём перевозок используется более эффективно [1]. Предложенное решение позволяет сократить издержки на доставку и является частью информационной системы оптимизации маршрута следования грузового транспорта [2].

В связи с тем, что разработка и тестирование составляющих компонентов проекта достаточно трудоемкий и ресурсоемкий процесс, предложено программное обеспечение для имитации процессов работы комплекса в целом.

Авторами работы поставлена задача по созданию программного продукта, обеспечивающего моделирование работы логистической инфраструктуры для контейнеров-трансформеров с использованием технологии беспроводной связи и «Интернета вещей», а также реализованы сервисы для быстрого обмена информацией между участниками (объектами и субъектами) этого процесса [3].

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи по разработке приложения-имитатора в первую очередь было необходимо выбрать веб-сервер. В качестве веб-сервера был выбран IIS (Internet Information Services) — проприетарный набор серверов для нескольких служб Интернета от компании Microsoft, а также веб-приложение ASP.NET Core, ввиду того, что приложения, построенные на данной технологии, являются переносимыми и легко настраиваемыми[2]. Фреймворк использует язык программирования C# и механизм представлений Razor[3].

В качестве базы данных для хранения моделируемых данных была выбрана система управления реляционными базами данных — Microsoft SQL Server [4].

Среди компонентов, входящих в состав программного обеспечения, имеется мобильное приложение для имитации поведения контейнера-транформера. С его помощью пользователь может создать модель контейнера, отслеживать его возможные состояния и показания датчиков. Приложение состоит из следующих функциональных блоков (разделов главного меню): «Показания датчиков», «GPS координаты», «Состояние контейнера» и «Фотофиксация».

---

[1] Петров О. А., Евстратов Е. М., Короткий А. А., Дроздов Д. С., Голубь К. А. Складной грузовой контейнер : патент 2672998 Рос. Федерация : B65D 88/52 / № 2017136697; заявл. 17.10.2017; опубл. 21.11.2018. Бюл. №33, 17 с.

[2] Internet Information Services / Википедия // ru.wikipedia.org : [сайт]. — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Internet_Information_Services (дата обращения : 15.04.2019).

[3] Рот Д. Введение в ASP. NET Core / Д. Рот, Р. Андерсон, Ш. Луттин // Micrоspoft : [сайт]. — URL : https://docs.microsoft.com/ru-ru/aspnet/core/introduction-to-aspnet-core?view=aspnetcore-3.1 (дата обращения : 13.04.2020).

В разделе главного меню «Показания датчиков» пользователь может отследить и изменить показания датчиков, а именно: температуру, вес груза, освещённость, влажность, уровень заряда батарей, уровень сигнала сети. Все сделанные пользователем изменения впоследствии сохраняются и далее происходит доступ к камере, фиксирующей состояние груза в контейнере-трансформере на момент изменения параметров (рис. 1).



Рис. 1. Показание датчиков

В разделе главного меню «GPS координаты» пользователю в реальном времени представлены GPS координаты контейнера. Добавочно отслеживаются дата и время изменения координат [5]. Все изменения через равные промежутки времени отправляются на сервер и фиксируются в базе данных (рис. 2).

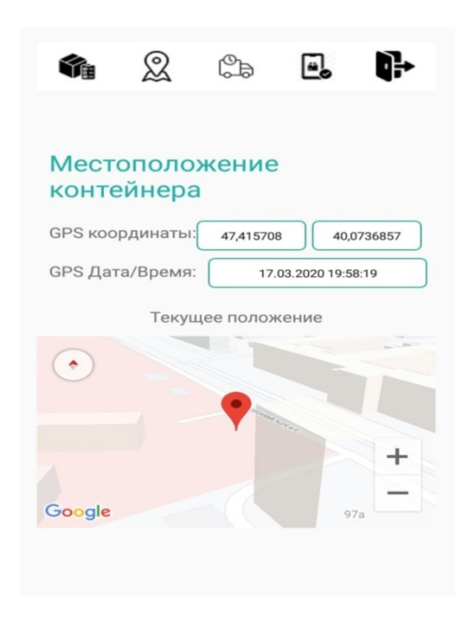


Рис. 2. GPS координаты контейнера

В разделе главного меню «Состояние контейнера» отслеживается положение дверей (открыта/закрыта) и контейнера (разложен/сложен), а также его положение: на складе, на автомобиле и у заказчика [6]. Как и в разделе главного меню «Показания датчиков», после того, как пользователь смоделировал объект и нажал на кнопку «Сохранить изменения», приложение переводит его через меню к камере телефона для выполнения фотофиксации (рис. 3).

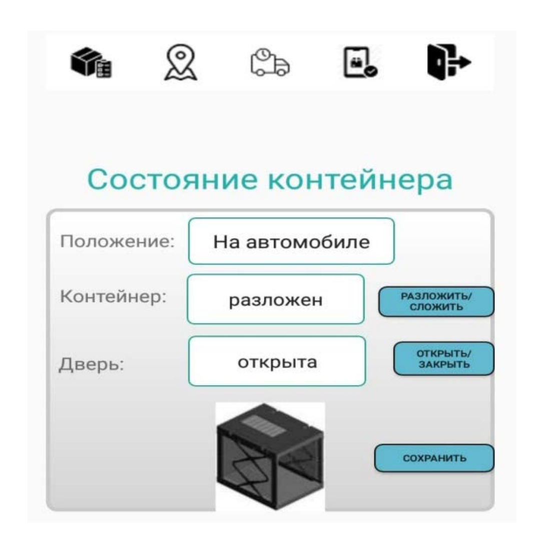


Рис. 3. Состояние контейнера

В разделе главного меню «Фотофиксация» отображаются последние показания датчиков контейнера-трансформера, а также GPS координаты. В итоге все смоделированные данные отображаются в табличном виде. Реализация фотофиксации является достаточно важной составляющей приложения, так как клиент получает возможность наглядно отслеживать состояние находящегося в контейнере-трансформере груза (рис. 4).

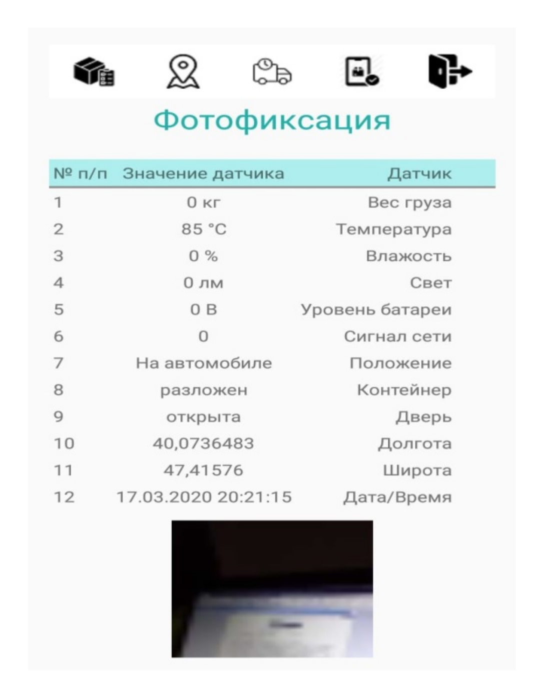


Рис. 4. Фотофиксация

Мобильное приложение, имитирующее контейнеры-трансформеры «SmartBoxCity», было создано для проверки работоспособности программного обеспечения с использованием технологии беспроводной связи и «Интернета вещей». Данные о параметрах контейнеров-трансформеров передаются на сервер и фиксируются в базе данных. Для проверки созданной модели возможно зайти в личный кабинет и на основании ранее созданной учётной записи просмотреть состояния объектов в реальном времени, отследить их местоположение с применением технологии Google Maps [7]. Имеется возможность через мобильное приложение производить настройки, имитирующие «поведение» контейнера-трансформера. Данные, получаемые данным имитатором, используются для решения логистических задач оптимизации грузоперевозок.

Результаты исследования. Таким образом, можно сделать вывод, что пользователь с помощью приложения-имитатора получает возможность осуществлять полноценный контроль над процессом моделирования поведения контейнера-трансформера.

Разработанные в составе приложения-имитатора компоненты являются основой тестирования будущей информационной системы, обеспечивающей реализацию информационной составляющей программного обеспечения автотранспортной инфраструктуры для поддержки и оптимизации логистических задач.

Разработанная архитектура информационной системы, представленная на рис. 5, прошла проверку на поддержку работы со множеством имитаторов контейнеров-трансформеров, показала устойчивость к нагрузкам и полноту функционала для решения и оптимизации логистических задач.

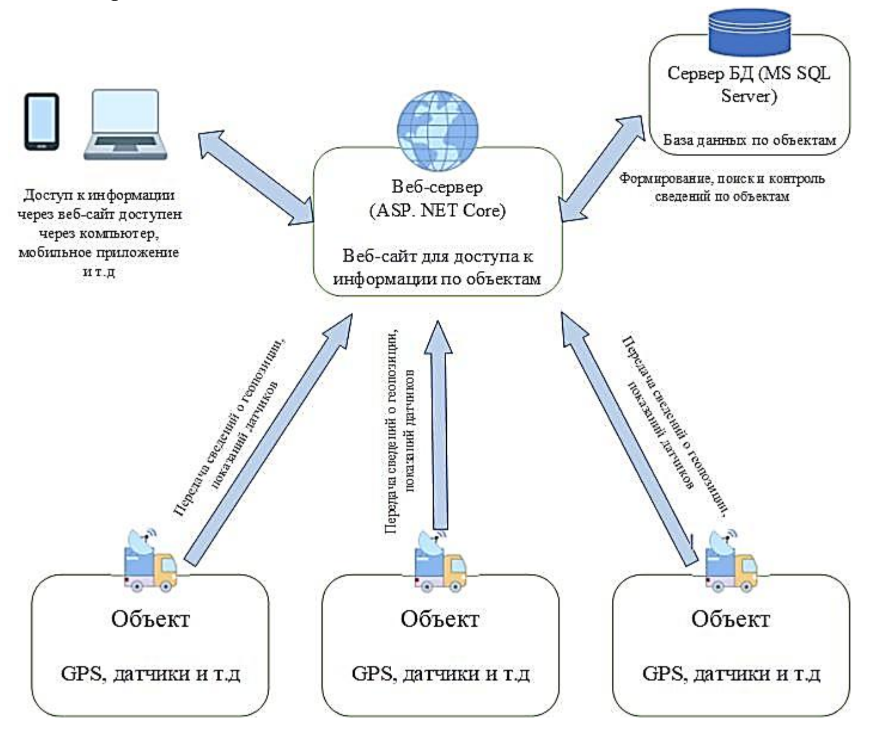


Рис. 5. Архитектурная схема системы

В процессе реализации программного обеспечения был создан веб-сервер, обеспечивающий обработку информации, получаемой от разработанного мобильного приложения — имитатора контейнера-трансформера, а также организована подсистема взаимодействия с реальными датчиками, входящими в состав объекта [8].

Обсуждения и заключения. Созданный имитатор, с помощью которого пользователь может моделировать поведение контейнера и отслеживать всевозможные показания его датчиков, является неотъемлемой частью создаваемого программного обеспечения для его отладки и тестирования при организации единого пространства по контролю и оптимизации грузоперевозок с использованием «умных» контейнеров-трансформеров при оказании транспортных услуг населению и юридическим лицам в урбанизированной среде.

Библиографический список

1. 2. Гальченко, Г. А. Информационно-коммуникационная логистическая система для оптимизации транспортных маршрутов в урбанизированной среде / Г. А. Гальченко, А. А. Короткий, В. В. Иванов // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2018. — № 4 (65). — С. 63–67. DOI : https://10.30987/article_5b28d18e203e46.88731833

2. Программный комплекс построения оптимального маршрута при караванном движении транспортных средств / А. А. Короткий, С. И. Попов, Г. А. Гальченко, Д. С. Дроздов // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2019) : сб. трудов VII междунар. науч.-практ. конф., посв. 90-летию ДГТУ (РИСХМ). Ростов-на-Дону, 2019. — С. 68–71.

3. Чамберс, Д. ASP.NET Core. Разработка приложений / Д. Чамберс, Д. Пэкетт, С. Тиммс. — Санкт-Петербург : Питер, 2018. — 464 с.

4. Petzold, Ch. Creating Mobile Apps with Xamarine. Forms: Cross-platform C# programming for iOS, Android, and Windows / Charles Petzold. — Redmond, WA, USA: Microsoft Press, 2016. — 41 p.

5. Черников, В. Разработка мобильных приложений на C# для iOS и Android / В. Черников. — Москва : ДМК Пресс, 2020. — 188 с.

6. Грин, Д. Изучаем C# / Д. Грин, Э. Стиллмен. — Санкт-Петербург : Питер, 2020 — 816 с.

7. Фримен, А. ASP.NET Core MVC с примерами на C# для профессионалов / А. Фримен. — Москва : Диалектика, 2017 — 991 с.

8. Филлипс, Б. Android. Программирование для профессионалов / Б. Филлипс, К. Стюарт, К. Марсикано. — Санкт-Петербург : Питер, 2017. — 688 с.

Поступила в редакцию 11.05.2020
Запланирована в номер 31.07.2020

Об авторах:

Короткий Анатолий Аркадьевич, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9446-4911, korot@novoch.ru

Масленников Алексей Александрович, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», (346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4042-314X, maslennikov@tmc-center.ru

Яковлева Дарья Алексеевна, студент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И.Платова», (346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2870-657X, dasha.yakovleva.2013@list.ru

Головко Илья Владимирович, студент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», (346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1426-9281, ilya.golowko2017@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Короткий — формирование основной идеи, доработка текста. А. А. Масленников — цели и задачи исследования, корректировка выводов, доработка текста. Д. А. Яковлева — подготовка текста, анализ результатов исследования, формирование выводов, описание программируемого имитатора. И. В. Головко — описание программируемого имитатора.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 007:631.4 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-317-324

Информационная система для оценки уровня зрелости организации



И. Н. Нурутдинова, Л. А. Димитрова
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерации)

Введение. Статья посвящена проблемам создания информационного обеспечения для решения задачи оценки уровня зрелости организации. Предлагается использование интеллектуальных информационных систем — экспертных систем. Кратко излагаются содержательные аспекты различных этапов создания таких систем, приводится архитектура экспертной системы, которая основана на использовании базы нечетких экспертных знаний. Целью работы являлось создание нового программного обеспечения для решения задачи оценки уровня зрелости организации.
Материалы и методы. Ранее выполненное моделирование рассматриваемой предметной области позволило создать базу знаний в виде набора продукционных правил, который является основой механизма нечеткого логического вывода. Программное обеспечение написано на PHP и пригодно для встраивания в комплексные web-приложения. Программная система представляет собой web-приложение, написанное преимущественно на PHP и JavaScript. Программное обеспечение работает во всех современных web-браузерах, что значительно ускоряет внедрение и развертывание на базе как основного предприятия, так и дочерних структур.
Результаты исследования. Создано новое программное обеспечение для автоматизации процесса обработки опросных листов при проведении самооценки организации на основе ключевых показателей, а также с учетом основных шести групп показателей системы менеджмента качества. Применение программы позволит значительно ускорить процесс ввода и обработки необходимой для проведения самооценки экспертной информации. Использование программы позволяет организациям получить адекватное представление о возможностях и перспективах улучшения системы менеджмента качества организации. Приведены фрагменты интерфейса программной системы.
Обсуждение и заключения. Предлагаемое программное обеспечение может быть использовано при определении уровня зрелости организации. Применение web-технологий повышает удобство пользования, снижает затраты на поддержку программного обеспечения. Программное обеспечение можно развернуть как в существующей сетевой инфраструктуре заказчика, так и пользоваться всем функционалом, подключаясь к удаленному серверу. Программное обеспечение оптимизировано под различные разрешения экрана, что позволяет использовать его не только в центральном офисе, но и при анализе системы менеджмента качества предприятий-клиентов. Трафик, генерируемый web-приложением, оптимизирован для работы с мобильными устройствами с низкоскоростным подключением к сети Интернет. Применение программы позволит значительно сократить время пользователей на ввод и обработку необходимой для решения задачи экспертной информации, исключить дублирование информации.

Ключевые слова: информационное обеспечение, система менеджмента качества, уровень зрелости организации, самооценка, экспертные системы.

Для цитирования: Нурутдинова, И. Н. Информационная система для оценки уровня зрелости организации / И. Н. Нурутдинова, Л. А. Димитрова // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, №3. — С. 317−324. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-317-324

Information system for assessing maturity level of an organization

I. N. Nurutdinova, L. A. Dimitrova
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The paper considers problems of creating information support for solving the task of assessing the maturity level of an organization. It is proposed to use intelligent information systems, i.e. expert systems. Substantive aspects of various stages of creating such systems are briefly described; the expert system architecture, which is based on using a fuzzy expert knowledge base, is given. The work objective was to create new software to solve the problem of assessing the maturity level of an organization.
Materials and Methods. Previously performed modeling of the subject domain under consideration allowed us to create a knowledge base in the form of production memory, which is the basis of the fuzzy inference mechanism. The software is written in PHP and is suitable for embedding in complex web applications. The software system is a web application written primarily in PHP and JavaScript. The software works in all modern web browsers, which accelerates significantly the implementation and deployment based on both the parent-enterprise and its subsidiaries.
Results. New software has been created to automate the processing of questionnaires during the organization's self-assessment based on key indicators, as well as considering 6 main groups of the quality management system indicators. Application of the program will significantly speed up the process of input and processing of expert information required for self-assessment. The program provides organizations to get an adequate idea of the opportunities and prospects for improving the organization's quality management system. Some fragments of the software system interface are given.
Discussion and Conclusions. The proposed software can be used to determine the level of maturity of an organization. The application of Web-technologies improves usability, reduces software support costs. The software can be both deployed in the existing network infrastructure of a customer and used by all the functionality through connecting to a remote server. The software is optimized for various screen resolutions, which allows you to use it not only at the central office, but also when analyzing the quality management system of corporate customers. The traffic generated by the web application is optimized for working with mobile devices with a low-speed Internet connection. Application of the program will significantly reduce the time for users to enter and process expert information required for the problem solving and to eliminate duplication of information.

***Keywords**:* information support, quality management system, level of maturity of an organization, self-assessment, expert systems.

For citation: I. N. Nurutdinova, L. A. Dimitrova. Information system for assessing maturity level of an organization. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 317−324. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-317-324

Введение. Достижение устойчивого успеха — актуальная задача для каждого хозяйствующего субъекта (предприятия, организации, фирмы и т. д.). Устойчивый успех функционирования организации предполагает обеспечение высоких значений показателей деятельности и их оптимальный баланс. При этом должны быть учтены интересы и потребности всех сторон, имеющих отношение к предприятию. Например, качество продукции должно соответствовать требованиям потребителей; сроки, объемы поставок и закупок — договорным обязательствам с партнерами и поставщиками; финансовые показатели — ожиданиям руководства и собственников. Современная быстроменяющаяся экономика требует оперативного реагирования на внешние воздействия, поэтому данный аспект анализа деятельности приобретает особое значение. Качественные и количественные характеристики, оказывающие влияние на функционирование организации, должны быть сбалансированы, что выступает основным критерием обеспечения успеха. Самооценка является одним из основных инструментов анализа функционирования организации и обеспечивает непрерывный мониторинг состояния организации, что является фундаментальным способом поддержания конкурентоспособности.

В нашей стране проблема самооценки деятельности организации изучена в достаточном объеме для отдельных направлений практического опыта. Это работы Э. А. Белокоровина, В. И. Галеева, Е. А. Горбашко, Т. Ю. Дворук, В. С. Дубинина, Т. Калиты, А. И. Кочетова, Д. В. Маслова, Ю. И. Мхитаряна, И. Г. Окрепиловой, Т. А. Салимовой, М. З. Свиткина и др.[1] Различные методы и подходы к самооценке и оценке деятельности организации в отдельных отраслях, а также ее перспектив в направлении улучшений и повышения конкурентоспособности рассматривались в зарубежных публикациях [1–5].

Актуальность проблемы, охватывающей разнообразные аспекты процесса самооценки организации на основе подхода с использованием системы менеджмента качества (СМК), подтверждается, в первую очередь, ее прикладным значением, так как уровни зрелости организации тесно связаны с проблемой обеспечения и контроля качества[2]. Для адекватной оценки функционирования СМК используют профессионалов предметной

[1] Маслов Д. В., Белокоровин Э. А. Управление качеством на малом предприятии. М., 2011. 192 с.
[2] ГОСТ Р ИСО 9004–2010. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М. : Стандартинформ. 2011. — 36 с.

области — экспертов. Однако существенной проблемой, сопутствующей решению задачи, является необходимость учета разнообразной, в том числе качественной, экспертной информации, субъективность оценок экспертов, а также недостаточное количество экспертов. В связи с этим для решения указанных задач целесообразно применение интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Использование новой технологии (экспертных систем) позволит найти оптимальное решение задачи самооценки организации. Дальнейшая всеобщая автоматизация предприятия будет обеспечиваться за счет разработки системы, включающей совокупность гибридных экспертных систем и, как следствие, приведет к повышению эффективности функционирования предприятия.

Применение экспертами знаний (эвристик), полученных в течение всего времени профессиональной деятельности в специализированной предметной области, является специфической особенностью экспертных систем (ЭС).

Когда качественные и количественные оценки неоднозначны, для принятия решений используются ЭС как в технических задачах принятия решений [6], так и для получения оценок в вопросах менеджмента, производственных, логистических процессах [7–11], оценки качества обслуживания[3], оценки качества знаний[4] и других гуманитарных областях. Для определения уровня зрелости организации авторами была предложена общая схема[5]. Схема предполагает использование оценок экспертов и создание ЭС [12], получение решений которой основано на нечетком логическом выводе [13–15].

Целью работы является создание компьютерной системы, обеспечивающей автоматизацию процесса самооценки, что существенно повысит эффективность деятельности лица, принимающего решение (ЛПР) в процессе решения этой задачи и, в частности, при определении уровня зрелости организации. Использование данной компьютерной системы позволяет применять эвристики профессионалов предметной области, раздвинуть границы вырабатываемых решений и рекомендаций и повысить их значимость.

Материалы и методы. Практика создания ЭС показывает, что эволюционный метод создания стал доминирующим в области ЭС. Рассмотрим содержательные аспекты этапов и особенности проектирования программного комплекса (рис. 1). Существенные особенности этапа идентификации заключаются в определении целей и задач создания ЭС; в выборе типа и широты постановки проблемы; в назначении требуемых ресурсов (сроки и «компьютерные мощности») и участников процесса разработки.

Перечислим типы задач, решаемые с применением ЭС:

— систематизация накопленного опыта проведения самооценки при анализе функционирования СМК;

— использование особенностей опыта решения задач экспертного оценивания;

— оперативное решение задачи оценки уровня зрелости организации;

— регистрация специфических моментов при аудите организации и распространение методов, направленных на устранение их негативного воздействия.

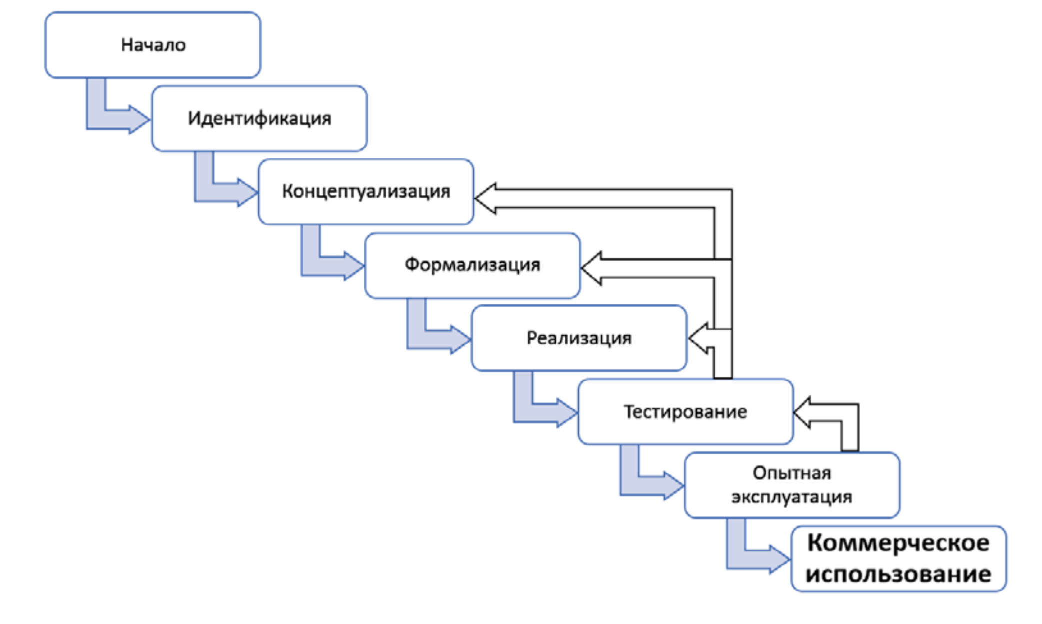


Рис. 1. Этапы и содержание задач разработки экспертной системы

[3] Борисова Л. В. Особенности экспертного контроля качества в сфере обслуживания // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование : сб. науч. тр. 5-й междунар. молодеж. науч.-практ. конф. Курск. 2014. Т.2. С. 110–113.

[4] Шумская Н. Н. О подходе к экспертной оценке качества знаний // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 8-й междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д. 2015. С. 321-324.

[5] Димитрова Л. А. Общая схема оценки уровня зрелости организации на основе нечетких экспертных знаний // Инновационные технологии в науке и образовании «ИТНО-2016» : сб. науч. тр. междунар. науч.-метод. конф. Ростов н/Д. 2016. С. 357–360.

На стадии концептуализации происходит очерчивание терминов, взаимосвязей и инструментов управления, требуемых для изложения методики реализации задачи.

Содержание этапа концептуализации включает выбор понятий, отношений и механизмов управления, необходимых для описания решения рассматриваемых задач. К примеру, термины, используемые для характеристики текущего положения организации, могут определяться положениями стандартов: менеджмент для достижения устойчивого успеха организации, стратегия и политика, менеджмент ресурсов, менеджмент процессов, мониторинг, измерение, анализ и изучение, улучшения, инновации и обучение.

На этапе формализации происходит создание структур для выражения знаний, основных терминов и взаимосвязей. Метод формального выражения в большинстве случаев определяется языком построения ЭС. Для построения модели предметной области использовался подход на основе методологии нечетких множеств [12–14].

Реализация и тестирование ЭС включают написание компьютерной программы, описание правил, включающих знания, оценка приведенных правил, и, конечное, получение оценки экспертной системы в целом.

Для автоматизации решения задачи самооценки был создан программный комплекс. На рис. 2 приведена структурная схема программного комплекса, созданного на базе полученных знаний о предметной области [12–14].

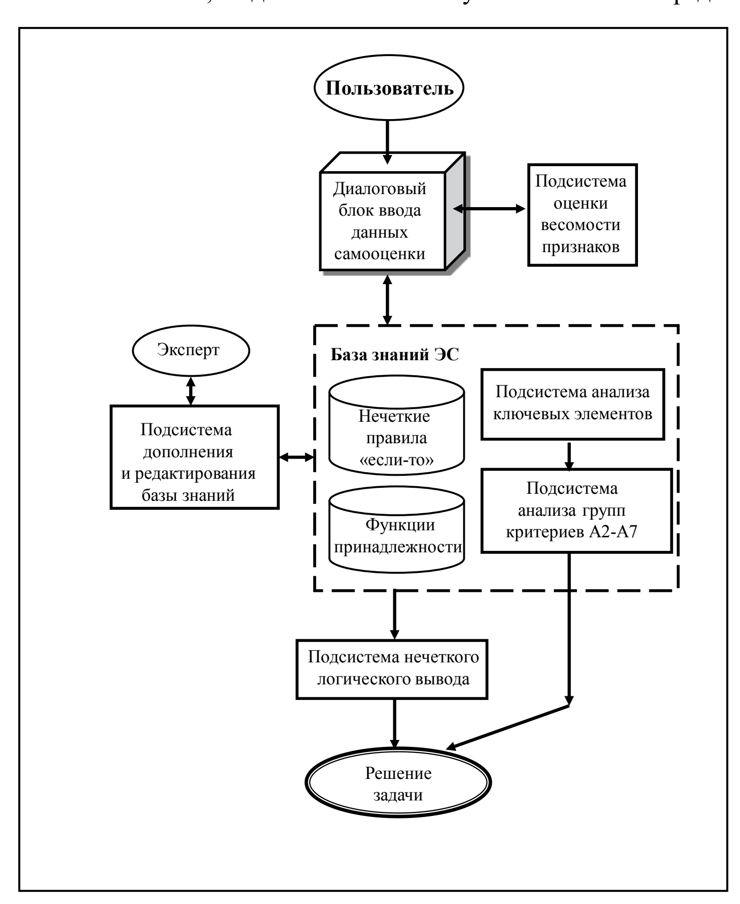


Рис. 2. Структурная схема экспертной системы

ЭС реализует следующие функции:

— описание разделов стандартов СМК, используемых при решении задачи оценки уровня зрелости организации;

— решение задачи самооценки на основе 9 основных критериев (в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9 004–2010;

— решение задачи на основе дополнительных 6 критериев [12–14];

— решение задач определения весомости критериев оценки[6];

— решение задач формализации нечеткой экспертной информации;

— объяснение полученных результатов;

— содействие ЛПР при эксплуатации ЭС.

Набор компонентов ЭС зависит от характерных свойств предметной области и первоочередных требований, выдвигаемых при ее создании.

[6] Нурутдинова И. Н., Шумская Н. Н., Димитрова Л. А. Об использовании весовых коэффициентов при формировании экспертной информации // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й междунар. юбил. науч.-практ. конф. Ростов н/Д. 2017. С. 332–334.

Особую роль в ЭС играет режим работы системы со знаниями. В приведенном режиме пользователю предоставлены следующие ресурсы: загрузка в систему знаний, выбранных экспертом; исключение выбранных знаний; изменение знаний; считывание базы знаний; консервация знаний.

Режим корректировки знаний поддерживает дополнение знаний следующих видов: оценка весомости факторов, число термов лингвистических переменных, параметры функций принадлежности, продукционные правила.

ЭС функционирует в двух режимах — приобретение знаний и решение задач.

Формирование базы знаний происходит посредством совместной работы инженера по знаниям и эксперта СМК.

Взаимодействие пользователя (ЛПР) с ЭС происходит в режиме решения задачи. Реализация естественно-языкового интерфейса с пользователем реализуется за счет диалогового блока ввода информации.

Основным компонентом всех программных продуктов выступает пользовательский интерфейс, спроектированный для неограниченного числа пользователей. Пользователи (эксперты) могут работать в системе одновременно, причем их количество неограниченно.

Для описываемой ЭС применяется три типа диалогов: диалог типа меню; диалог типа вопрос-ответ; диалог на основе экранных форм.

Таким образом, рассмотренный программный комплекс представляет собой инструментальную среду, позволяющую пользователю решать разнообразные задачи оценки уровня зрелости организации в интерактивном режиме.

Результаты исследования. Программный продукт выполнен в виде кроссплатформенного клиент-серверного приложения. Хранение и обработка всех данных осуществляется на web-сервере, пользователь взаимодействует с web-сервером при помощи интернет-браузера (поддерживаются все современные интернет-браузеры — Mozilla Firefox, Google Chrome, Microsoft Edge, Opera, а также их мобильные версии). Для реализации графического интерфейса пользователя применяется HTML и JS, серверная логика реализована на PHP. Пользователь может пользоваться клиентской частью приложения, используя широкий перечень платформ (ПК, ноутбуки, планшеты, смартфоны) и операционных систем (Windows, MacOS X, Android, iOS).

После авторизации (ввода имени пользователя и пароля) пользователь попадает на стартовую страницу приложения и получает доступ к главному меню системы. Если с конкретным экспертом опрос проводится в первый раз, необходимо заранее ввести в базу данных его атрибуты. Сделать это можно нажав на ссылку «Регистрация нового пользователя» в главном меню системы. В том случае, если данные эксперта уже введены в систему, пользователь может приступать к проведению опроса как по ключевым элементам, так и по расширенному списку вопросов (подсистема «подробная самооценка, п. А2–А7»).

После окончания ввода данных можно сразу получить результаты проведения оценки как по простой шкале, так и с учетом заранее введенных коэффициентов весомости критериев, выбрав соответствующие ссылки в главном меню программы. Результат решения задачи представляется в текстовой форме, графической, в виде диаграммы RADAR и анимированной приборной панели, разделенной на сектора, соответствующие каждому из уровней зрелости организации.

Применение данной системы, основанной на знаниях опытных специалистов, позволит сократить временные затраты, расширить спектр принимаемых решений и улучшить их обоснованность, сохранить эмпирические знания, полученные в ходе решения задачи самооценки.

На рис. 3 представлено главное меню системы автоматизированного решения задачи оценки уровня зрелости организации, а на рис. 4 — экран опроса пользователя.

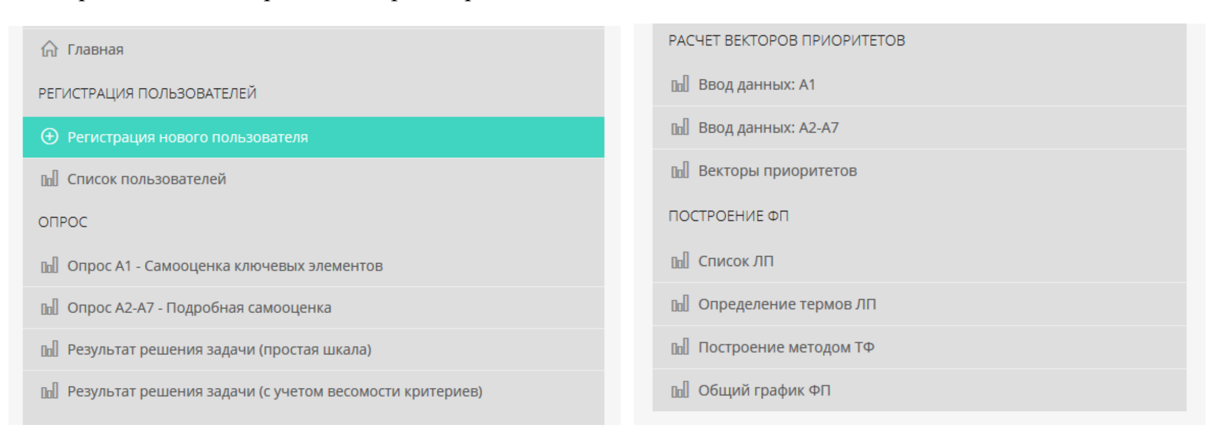


Рис. 3. Главное меню программного комплекса

Главная • Прохождение опроса А1

Прохождение опроса А1 - Самооценка ключевых элементов

НА ЧТО ОРИЕНТИРОВАН МЕНЕДЖМЕНТ? (РУКОВОДСТВО)

- На продукцию, акционеров и некоторых потребителей при ситуативном реагировании на изменения, проблемы и возможности
- На потребителей и законодательные/нормативные требования с некоторой долей структурированного реагирования на проблемы и возможности
- На работников организации и некоторые дополнительные заинтересованные стороны. Определены и реализуются процессы реагирования на проблемы и возможности
- На сбалансированный подход к потребностям определенных заинтересованных сторон. Постоянное совершенствование находится в центре внимания организации
- На сбалансированный подход к новым заинтересованным сторонам. Главной целью является достижение наивысшей эффективности для своего класса

КАКОВ ПОДХОД РУКОВОДСТВА? (РУКОВОДСТВО)

- Подход пассивный и построен по командному принципу
- Подход пассивный и основан на решениях руководителей разного уровня
- Подход активный, и право принятия решений передано трудовым коллективам
- Подход активный, характеризуемый активным участием работников организации в принятии решений
- Подход активный, направленный на обучение и наделение полномочиями работников всех уровней

Рис. 4. Экран опроса пользователя

В результате опроса и анализа результатов (на базе внесенных экспертом знаний предметной области) ЛПР получает решение задачи (рис. 5 и 6).



Рис. 5. Общий вид диаграммы опроса пользователя

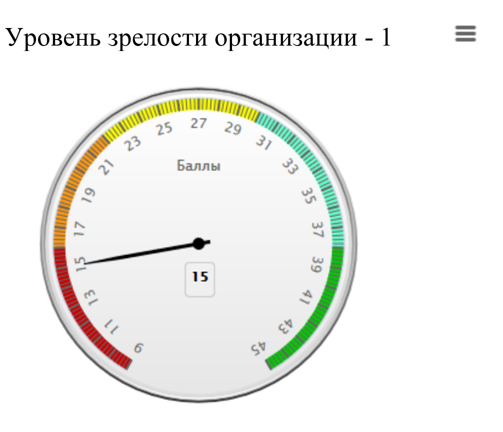


Рис. 6. Представление результатов оценки в виде диаграммы

Решение задачи оценки уровня зрелости организации может быть получено с учетом весомости как ключевых показателей, так и основных групп критериев оценки.

Обсуждение и заключения. Предлагаемое программное обеспечение (ПО) может быть использовано при определении уровня зрелости организации. Применение web-технологий повышает удобство пользования, снижает затраты на поддержку ПО. ПО можно развернуть как в существующей сетевой инфраструктуре заказчика, так и пользоваться всем функционалом, подключаясь к удаленному серверу. ПО оптимизировано под различные разрешения экрана, что позволяет использовать его не только в центральном офисе, но и при анализе СМК предприятий-клиентов. Трафик, генерируемый web-приложением, оптимизирован для работы с мобильными устройствами с низкоскоростным подключением к сети Интернет. Применение программы позволит значительно сократить время пользователей на ввод и обработку необходимой для решения задачи экспертной информации, исключить дублирование информации.

Создана ЭС, представляющая из себя инструментальную программную среду. В рамках работы ЭС допустимо формировать желаемые конфигурации ЭС (подсистем ввода знаний), которые включают в себя разнообразные сочетания лингвистических переменных и всевозможные способы построения функций принадлежностей. Данная ЭС является универсальной, пригодной для применения в любых хозяйственных субъектах, она позволяет классифицировать систему по уровню зрелости и определять потенциалы улучшения.

Практической реализацией разработанных алгоритмов является создание программных средств, на которые получены свидетельства на интеллектуальную собственность (№ 2017660792 и № 2017660791).

Библиографический список

1. Andersen, E. S. Project maturity in organizations / E. S. Andersen, S. A. Svein // International Journal of Project Management. — 2003. — Vol. 21, iss. 6 . — P. 457−461. DOI: 10.1016/S0263-7863(02)00088-1

2. Xu, D-L. Intelligent decision system for self-assessment / D-L. Xu, J-B. Yang // Journal of multi-criteria decision analysis. — 2003. — Vol. 12, iss. 1. — P. 43−60. DOI: 1002/mcda.343

3. Xu, D-L. Intelligent decision system and its application in business innovation self assessment / D-L. Xu, G. McCarthy, J-B. Yang // Decision support system. — 2006. — Vol. 42, iss. 2. — P. 664-673. DOI: 10.1016/j.dss.2005.03.004

4. Enke, J. Systematic learning factory improvement based on maturity level assessment / J. Enke [et al.] // Procedia Manufacturing. — 2018. — Vol. 23. — P. 51–56. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.160

5. Neverauskas, B. The theoretical approach to project portfolio maturity management / B. Neverauskas, R. Čiutienė // Economics and Management. — 2011. — Vol. 16. — P. 845−851.

6. Макаров, И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров [и др.] — Москва : Наука, 2006. — 333 с.

7. Hrehova, S. Application of fuzzy principles in evaluating quality of manufacturing process / S. Hrehova, A. Vagaska // WSEAS Transactions on Power Systems. — 2012. — Vol. 7. — P. 50−59.

8. Бирюков, А. Н. Метод оценки зрелости организации с использованием модели BPMM и его реализация / А. Н. Бирюков, Д. Ю. Клецких // Бизнес-информатика. — 2011. — № 3 (17). — С. 45–52.

9. Ding, J.-F. Assessment of Customer Relationship Management for Global Shipping Carrier-based Logistics Service Providers in Taiwan: An Empirical Study / J.-F. Ding // WSEAS Transactions on Systems. — 2012. — Vol.1, iss. 6. — P. 198−208.

10. Еремина, Е. А. Информационная система выбора поставщика на основе метода нечеткого логического вывода / Е. А. Еремина, Д. Н. Ведерников // Современные проблемы науки и образования : [сайт]. — 2013. — № 3. — URL : http://science-education.ru/ru/article/view?id=9317 (дата обращения : 05.03.2020).

11. Wang, G. Modelling and Analyzing Trust Conformity in E-Commerce Based on Fuzzy Logic / G. Wang [et al.] // WSEAS Transactions on Systems. — 2015. — Vol. 14. — P. 1−10.

12. Борисова, Л. В. Информационная поддержка мониторинга состояния организации / Л. В. Борисова, Л. А. Димитрова, И. Н. Нурутдинова // Вестник Донского государственного технического университета — 2016. — № 4. — С. 126–133. DOI : 10.12737/22154

13. Борисова, Л. В. Методика оценки уровня зрелости организации на основе нечеткого моделирования / Л. В. Борисова, Л. А. Димитрова, И. Н. Нурутдинова // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 1 (88). — С. 113–121. DOI : 10.23947/1992-5980-2017-17-1-113-121

14. Nurutdinova, I. Intelligent System for Assessing Organization's Possibilities to Achieve Sustained Success / I. Nurutdinova, L. Dimitrova // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2019. — Vol. 875. — P. 379−388.

Сдана в редакцию 30.04.2020
Запланирована в номер 15.06.2020

Об авторах:

Нурутдинова Инна Николаевна, доцент кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ResearcherID: E-3961-2018, ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-3375-1295, nurut.inna@yandex.ru

Димитрова Любовь Азатовна, ассистент кафедры «Управление качеством» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5196-5975, kaf-qm@donstu.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. Н. Нурутдинова — формирование цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов. Л. А. Димитрова — разработка структуры программной системы, проведение расчетов, разработка программного обеспечения, подготовка текста, формирование выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 004.852 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-325-331



Обзор нечетких задач маршрутизации транспорта

Ю. О. Чернышев [1], В. Н. Кубил[2], А. В. Требухин[1]
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена рассмотрению различных алгоритмов решения нечетких задач маршрутизации транспорта. Целью работы явилось исследование современных методов оптимального решения нечетких, случайных и грубых задач маршрутизации транспорта.
Материалы и методы. В работе проведен обзор нечетких задач маршрутизации транспорта, существующих методов и подходов их решения. Выделены наиболее эффективные особенности некоторых подходов к решению нечетких задач маршрутизации транспорта с учетом их специфики.
Результаты исследования. Нечеткая задача маршрутизации транспорта FVRP (Fuzzy Vehicle Routing Problem) возникает всякий раз, когда данные для маршрутизации расплывчаты, неясны или неоднозначны. Зачастую такие нечеткие элементы могут лучше отражать реальность. Однако очень сложно использовать алгоритмы решения детерминированных VRP (Vehicle Routing Problem) для решения FVRP, поскольку несколько фундаментальных свойств детерминированных задач больше не выполняются в FVRP. Поэтому для решения таких задач необходимо ввести новые модели и алгоритмы нечеткого программирования. Таким образом, использование методов теории нечетких множеств позволит успешно моделировать задачи, содержащие элементы неопределенности и субъективности.
Обсуждение и заключения. В результате проведенного обзора различных методов и подходов решения задач маршрутизации транспорта сделаны выводы о том, что разработка и исследование новых решений привлекает на сегодняшний день большое внимание исследователей, но степень проработанности различных вариантов различается. Методы оптимального решения нечетких задач маршрутизации транспорта ограничиваются, в основном, какой-то одной нечеткой переменной. Работ, которые рассматривают большее число нечетких переменных, существует очень ограниченное количество.

Ключевые слова: нечеткая задача маршрутизации транспорта, оптимизация, нечеткие методы, эвристические алгоритмы, гибридные алгоритмы.

Для цитирования: Чернышев, Ю. О. Обзор нечетких задач маршрутизации транспорта / Ю. О. Чернышев, В. Н. Кубил, А. В. Требухин // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 325−331. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-325-331

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №18-01-00314, №19-01-00357).



Overview of fuzzy vehicle routing problems

Yu. O. Chernyshev[1], V. N. Kubil[2], A. V. Trebukhin[1]
[1]Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] Platov South-Russian State Polytechnic University (Novocherkassk, Russian Federation)

Introduction. Various algorithms for solving fuzzy vehicle routing problems are considered. The work objective was to study modern methods for the optimal solution to fuzzy, random and rough vehicle routing problems.
Materials and Methods. The paper reviews fuzzy vehicle routing problems, existing methods and approaches to their solution. The most effective features of some approaches to solving fuzzy vehicle routing problems considering their specificity, are highlighted.

Results. The Fuzzy Vehicle Routing Problem (FVRP) occurs whenever the routing data is vague, unclear, or ambiguous. In many cases, these fuzzy elements can better reflect reality. However, it is very difficult to use Vehicle Routing Problem (VRP) solving algorithms to solve FVRP since several fundamental properties of deterministic problems are no longer fulfilled in FVRP. Therefore, it is required to introduce new models and algorithms of fuzzy programming to solve such problems. Thus, the use of methods of the theory of fuzzy sets will provide successful simulation of the problems containing elements of uncertainty and subjectivity.
Discussion and conclusions. As a result of reviewing various methods and approaches to solving vehicle routing problems, it is concluded that the development and study of new solutions come into sharp focus of researchers nowadays, but the degree of elaboration of various options varies. Methods for the optimal solution of FVRP are limited, in general, to some single fuzzy variable. There is a very limited number of papers that consider a large number of fuzzy variables.

***Keywords**:* fuzzy vehicle routing problem, optimization, fuzzy methods, heuristic algorithms, hybrid algorithms.

For citation: Yu. O. Chernyshev, V. N. Kubil, A. V. Trebukhin. Overview of fuzzy vehicle routing problems. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 325−331. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-325-331

Funding information: the research is done with the financial support from RFFI (grants nos. 18-01-00314, 19-01-00357).

Введение. Задача маршрутизации транспорта — Vehicle Routing Problem (VRP) заключается в том, чтобы определить оптимальные маршруты для парка транспортных средств, представляющих упорядоченную последовательность прохождения через пункты погрузки и разгрузки, удовлетворяя некоторым ограничениям. К ограничениям следует отнести спрос на товары, грузоподъемность (вместимость) транспортного средства, максимальное время и временные окна. Оптимальность может оцениваться по-разному. Среди наиболее распространенных критериев минимизации: суммарное расстояние, стоимость транспортировки, размер задействованного парка транспортных средств.

С тех пор как VRP впервые была предложена Данцигом и Рамсером в 1959 году [1], она привлекла широкое внимание экспертов, ученых и менеджеров в различных сферах и стала предметом изучения в области исследования операций и оптимизации логистических систем. Было проведено значительное количество успешных исследований.

На начальном этапе большинство традиционных исследований VRP предполагали, что вся информация является детерминированной, включая спрос клиентов, характеристики парка транспортных средств, состояние дороги и прочие данные, необходимые для построения маршрутов. То есть традиционные исследования были посвящены детерминированным VRP. Однако в реальной логистической системе трудно описать информацию VRP как детерминированную из-за таких факторов, как влияние погоды, дорожных условий, скорости транспортного средства, индивидуальных потребностей клиента, а также когнитивных особенностей лиц, принимающих решения. Всякая неопределенность в таких задачах концентрируется на спросе, времени и др., позволяет классифицировать их как недетерминированные VRP. По сравнению с детерминированными, недетерминированные VRP отражают изменения времени и спроса, влияние назначений маршрутизации транспортных средств в реальном времени, что приближает их к фактическим производственным и логистическим процессам. Предлагавшиеся алгоритмы и выводы, справедливые для детерминированных задач, обычно не применялись для недетерминированных. Более того, в силу описанных выше особенностей, математическое описание недетерминированных задач является более сложным, а также возрастает сложность поиска возможных решений. Поэтому недетерминированные VRP привлекают все больше внимания и становятся одним из актуальных центров современных исследований VRP [2].

Определение и классификация недетерминированных задач маршрутизации транспорта. Недетерминированными являются такие VRP, в которых планировщик не владеет полной информацией о маршруте транспортного средства вплоть до начала осуществления заданного маршрута. То есть, некоторая информация может быть неопределенной, неоднозначной или даже неизвестной. После первоначального построения маршрута транспортного средства назначение маршрута транспортного средства и задание может быть изменено [3]. Очевидно, что недетерминированная VRP в этом смысле является более общей, чем детерминированная.

В смежных исследованиях неопределенность включает в себя три основных формы: случайность, нечеткость и неточность (грубость) [2]. В некоторых системах указанные выше неопределенности могут сосуществовать вместе. В настоящее время неопределенность VRP в основном вызвана случайностью и нечеткостью и может использовать нечеткую случайность или случайную нечеткость для описания сосуществования случайности и нечеткости в VRP.

С появлением многочисленных обобщений и расширений VRP ученые стали рассматривать их под разными ракурсами и классифицировать в соответствии с различными стандартами [4]. Опираясь на классификацию Цао [5] и выделенные формы неопределенности задач, можно разделить недетерминированные VRP на синглетные и двойные [6].

К синглетным недетерминированным VRP относятся:

— Stochastic VRP (SVRP) — случайная задача маршрутизации транспорта;
— Fuzzy VRP (FVRP) — нечеткая задача маршрутизации;
— Rough VRP — грубая задача маршрутизации транспорта.
— К двойным недетерминированным VRP относятся различные попарные комбинации синглетных:
— Fuzzyrandom VRP (FRVRP) — нечетко-случайная задача маршрутизации транспорта;
— Randomfuzzy VRP (RFVRP) — случайно-нечеткая задача маршрутизации транспорта;
— Fuzzyrough VRP — нечетко-грубая задача маршрутизации транспорта;
— Roughfuzzy VRP — грубо-нечеткая задача маршрутизации транспорта;
— Randomrough VRP — случайно-грубая задача маршрутизации транспорта;
— Roughrandom VRP — грубо-случайная задача маршрутизации транспорта;
— Dualfuzzy VRP — двойная нечеткая задача маршрутизации транспорта;
— Dualrandom VRP — двойная случайная задача маршрутизации транспорта;
— Dualrough VRP— двойная грубая задача маршрутизации транспорта.

Случайные задачи SVRP отличаются от детерминированных VRP тем, что некоторые исходные данные задачи не полностью определены до начала осуществления заданного маршрута транспортным средством. Планировщик может получить статистические закономерности для этих данных на основе предыдущих наблюдений или анализа рынка. То есть, некоторые параметры в SVRP являются случайными, главным образом такие, как спрос клиентов, время обслуживания клиентов (временные окна), распределение клиентов, доступные транспортные средства, время обслуживания, время в пути и т.д. Хороший обзор основных вариантов SVRP сделали Жандро и Лапорт [7]. В настоящее время исследование основных SVRP концентрируется на случайном спросе, случайном времени в пути, случайных клиентах и подобных задачах.

В нечетких задачах FVRP, как и в случайных задачах SVRP, присутствует неопределенность относительно некоторых данных задачи. Однако, если случайность предполагает существование некоторых известных статистических закономерностей, которые можно использовать, то нечеткость таковые закономерности исключает. Данный обзор сосредоточен именно на нечетких задачах маршрутизации транспорта, представляющих в настоящее время большой интерес для исследований.

Результаты исследования. Нечеткие задачи маршрутизации транспорта. Нечеткая задача маршрутизации транспорта FVRP возникает всякий раз, когда данные для маршрутизации расплывчаты, неясны или неоднозначны. Например, когда, исходя из опыта, время в пути транспортного средства можно описать как «около получаса», «между 15 и 20 минутами» и так далее. Зачастую, такие нечеткие элементы могут лучше отражать реальность. На практике бывает трудно получить точные значения запросов, времени пути, количества и местоположения клиентов, границ временных окон и других величин, если они подчиняются вероятностным законам. В некоторых новых системах также сложно описать параметры задачи как случайные величины из-за недостаточности данных для анализа распределения. Однако очень сложно использовать алгоритмы решения детерминированных VRP для решения FVRP, поскольку несколько фундаментальных свойств детерминированных задач больше не выполняются в FVRP. Поэтому, для решения таких задач необходимо ввести новые модели и алгоритмы нечеткого программирования. Таким образом, использование методов теории нечетких множеств позволит успешно моделировать задачи, содержащие элементы неопределенности и субъективности.

Схема решения: необходимо сначала сделать информацию нечеткой, затем использовать идею нечетких рассуждений для построения определенных нечетких критериев и преобразовать нечеткие переменные в их четкие эквиваленты с помощью дефаззификации. В настоящее время исследования FVRP в основном сосредоточены на нечетком спросе, нечетких временных окнах, нечетком времени в пути и нечетком времени обслуживания.

VRP with fuzzy demands (VRPFD) — задача маршрутизации транспорта с нечетким спросом клиентов на товар. VRPFD предполагает, что клиенты, которые нуждаются в обслуживании, определены, но их точный спрос является неопределенным, и статистическое правило их спроса не может быть получено. Нет сомнений в том, что VRPFD является наиболее изученной областью FVRP. Предположительно, что самое раннее описание VRPFD было предложено Теодоровичем в 1996 году [8]. Теодорович изучил VRPFD с одним депо, разработал правила нечеткого решения, основанные на оценке склонности, предложил первую фазу решения, основанную

на эвристическом алгоритме заметания, затем на основе сгенерированного решения осуществлял его постепенное улучшение, оптимизируя маршруты. С тех пор несколько ученых с некоторым успехом использовали различные эвристики для решения YRPFD. На основе нечеткой возможности [3, 9–13], бинарных подходов [14] и нечеткой достоверности [15] они применили улучшенный эвристический алгоритм или гибридный эвристический алгоритм для решения VRPFD. Наиболее широко используемый алгоритм — модифицированный гибридный генетический алгоритм [9–11]. Кроме того, для решения такого рода задач были применены и другие алгоритмы [3, 12–14, 15], такие как модифицированный муравьиный алгоритм, гибридный дифференциальный эволюционный алгоритм и улучшенная оптимизация роя частиц.

VRP with fuzzy time windows (VRPFTW) — задача маршрутизации транспорта с нечеткими временными окнами. VRPFTW является аналогом |задачи маршрутизации транспорта с мягкими временными окнами. В нём нарушение временных окон не обязательно влечет за собой штрафные санкции, но есть некоторая неопределенность относительно долгосрочных последствий за качество обслуживания. Для этого нечетким обычно считается либо время прибытия, либо верхние и нижние границы временных окон. Ван [16] впервые применил такую нечеткую теорию на примере задачи коммивояжера — инспекция дорог (китайского почтальона) с временными окнами. Тан и др. [17] предложили математическую модель VRPFTW и метод ее решения в два этапа: сведение к традиционной VRP с временными окнами и ее решение, а затем решение задачи улучшения обслуживания на основе алгоритма Гомори и метода субградиентов. Для комплексного варианта VRPFTW с множеством депо и разнородным парком предлагалась многоэтапная эвристика [18]: кластеризация клиентов, маршрутизация, определение типов транспортных средств, планирование и улучшение маршрутов с использованием имитации отжига и повышения уровня обслуживания клиентов. Хорошие результаты также показали метод оптимизации роем частиц [19] и модифицированный алгоритм стаи волков [20].

VRP with fuzzy duetime (VRPFDT) — задача маршрутизации транспорта с нечетким временем посещения. VRPFDT отличается тем, что временные окна заменяются нечеткими сроками. Связано это с тем, что временные окна в детерминированной VRP не могут отражать предпочтения клиентов в реальном времени. Например, клиенты могут желать получить услугу в определенные моменты времени, их удовлетворение может снизиться, если услуга предлагается раньше времени или с опозданием. Отсюда и возникает нечеткое время для посещения. Ченг и др. [21] впервые предложили понятие VRPFDT в м 1995 году и построили модель VRP в условиях однократного вывоза или однократной доставки, предложили усовершенствованный гибридный генетический алгоритм для решения такой модели VRP, используя процедуры «push-bump-throw». После этого Теодорович [22] исследовал нечеткую динамическую задачу построения маршрутов между соответствующими пунктами вывоза и доставки (Dial-A-RideProblem) и дополнительно проанализировал VRP с нечетким временем посещения и нечетким временем пути. Кроме того, другие методы, такие как эвристический алгоритм вставки, модифицированный муравьиный алгоритм, генетический алгоритм и так далее, играют важную роль в решении VRPFDT [23, 24].

VRP withfuzzytraveltime (VRPFT) — задача маршрутизации транспорта с нечетким временем пути. В VRPFT время пути транспортного средства при назначении ему маршрута является нечетким, в то время как другие параметры заданы и являются детерминированными. В настоящее время исследования по VRPFT достаточно скудные и включают всего несколько публикаций. Теодорович впервые ввел нечеткую теорию в VRPFT в 1991 году [25], предположив, что времена перемещения между пунктами являются нечеткими переменными. Он построил модель VRPFT и предложил алгоритм Кларка-Райта для ее решения. На основании нечеткой возможности и достоверности, Чен [26] и Чжэн [27] изучили VRPFT с временными окнами и предложили алгоритм империалистической конкуренции и гибридный генетический алгоритм. Цзя [28] использовал генетический алгоритм для решения VRPFT, основанный на методе измерения I_L. Брито [29] и Чжан [30] разработали гибридный генетический алгоритм для решения VRPFT на основе нечеткой логики.

VRP withfuzzyservicetime (VRPFST) - задача маршрутизации транспорта с нечетким временем обслуживания. VRPFST возникает в компаниях, которые не располагают точной информацией о времени обслуживания, необходимом для каждого поступающего заказа. Тем не менее, принятые решения должны учитывать предполагаемое время обслуживания и имеющиеся ресурсы, включая рабочие часы и количество доступных транспортных средств. Для динамического варианта этой задачи Куо и др. [31] успешно применили нечеткий муравьиный алгоритм со встроенной процедурой кластерной вставки.

Кроме того, в некоторых литературных источниках исследовались VRP с нечеткими стоимостными коэффициентами [32], VRP с нечеткими временными окнами [33], VRP с одновременно нечетким временем пути и временем посещения [22, 34], и VRP с нечетким временем в пути и временем посещения [35], и так далее.

В последние годы, в силу обеспокоенности мирового сообщества проблемами экологии, набирает популярность направление зеленой транспортной логистики [36], в рамках которого возникла зеленая задача маршрутизации транспорта -green VRP [37], призванная найти баланс между экономической выгодой и последствиями для окружающей среды. Для нечеткого варианта такой задачи недавно был предложен гибридный генетический алгоритм, совмещенный с нечетким моделированием [38].

Обсуждение и заключения. Основываясь на представленном в обзоре материале можно сделать вывод о том, что исследование нечетких задач маршрутизации транспорта привлекает все большее внимание, но степень разработанности отдельных ее вариантов разнится. Следует отметить, что на сегодняшний день исследования FVRP в основном ограничиваются какой-то одной нечеткой переменной, такой как нечеткий спрос или нечеткое время посещения клиентов. Исследований, рассматривающих всесторонне большее число нечетких переменных, сравнительно мало [22, 34, 35]. Другая существующая проблема заключается в том, что роль опыта предприятия-распределителя в FVRP редко учитывается, из-за чего практическая применимость незначительна. Для устранения разрыва между теоретическими исследованиями и практическим применением необходимо усилить комплексные исследования. Также открытыми остаются вопросы сочетания этих исследований с некоторыми новыми технологиями, такими как электронная коммерция, Интернет вещей и большие данные. Кроме того, до сих пор не построена система оценки алгоритмов решения FVRP.

Библиографический список

1. Dantzig, G.B. The Truck Dispatching Problem / G.B. Dantzig, J.H. Ramser // Management science. — 1959. — Vol. 6, no. 1. — P. 80−91.

2. Liu, B. Uncertain programming with applications / B. Liu, R. Zhao, G. Wang // Beijing: Chinese Tsinghua University Press, 2003. — P. 52−43.

3. Erbao, C. The Open Vehicle Routing Problem with Fuzzy Demands / C. Erbao, L. Mingyong // Expert Systems with Applications. — 2010. — Vol. 37, no. 3. — P. 2405−2411.

4. Кубил, В. Н. Обзор обобщений и расширений задачи маршрутизации транспорта / В. Н. Кубил // Вестник РГУПС. — 2018. — № 2. — С. 97–109.

5. Erbao, C. Research on Vehicle Routing Problems Models and Algorithms of Logistics Distribution, Ph.D. thesis / C. Erbao. — China: Hunan University, 2008. — P. 89−92.

6. Chen, D. Nondeterministic Vehicle Routing Problem: A Review / D. Chen, D. Chen, Y. Yang // Advances in Information Sciences and Service Sciences. — 2013. —Vol. 5, no. 9. — P. 485−493.

7. Gendreau, M. Stochastic vehicle routing / M. Gendreau, G. Laporte, R. Séguin //European Journal of Operational Research. — 1996. — Vol. 88, no. 1. — P. 3−12.

8. Teodorović, D. The fuzzy set theory approach to the vehicle routing problem when demand at nodes is uncertain / D. Teodorović, G. Pavković // Fuzzy sets and systems. — 1996. — Vol. 82, no. 3 — P. 307−317.

9. Zhang, J. A hybrid genetic algorithm to fuzzy vehicle routing problem / J. Zhang, J. Li // Journal of Industrial Engineering. — 2005. — P. 23-26. DOI: 10.1109/FSKD.2014.6980823

10. Xu, J. Genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows and fuzzy demand / J. Xu, G. Goncalves, T. Hsu // IEEE Congress on Evolutionary Computation. — 2008. — P. 4125−4129. DOI: 10.1109/CEC.2008.4631360

11. Ye, X. A fuzzy vehicle routing assignment model with connection network based on priority-based genetic algorithm / X. Ye, J. Xu // World Journal of Modelling and Simulation. — 2008. — Vol. 4, no. 4. — P. 257−268.

12. Peng, Y. A particle swarm optimization to vehicle routing problem with fuzzy demands / Y. Peng, Y. Qian // Journal of Convergence Information Technology. — 2010. — Vol. 5, no. 6. — P. 112−119.

13. Tian, J. Emergency supplies distributing and vehicle routes programming based on particle swarm optimization / J. Tian, W.Z. Ma, Y.L. Wang [et al.] // Systems Engineering-Theory & Practice. — 2002. — Vol. 30, no. 5. — P. 898−906.

14. Chen, B. Vehicle routing problem with fuzzy demands and its heuristic ant colony algorithm / B. Chen, S. Song, X. Chen // Journal of Computer Applications. — 2006. — Vol. 11. — P. 25−35.

15. Erbao, C. A hybrid differential evolution algorithm to vehicle routing problem with fuzzy demands / C. Erbao, L. Mingyong // Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 231, No. 1, 2009. pp. 302−310.

16. Wang, H.F. Time-constrained Chinese postman problems / H.F. Wang, Y.P. Wen// Comput. Math. Appl. — 2002. — Vol. 44. — P. 375−387.

17. Tang, J. Vehicle routing problem with fuzzy time windows / J.Tang, Z. Pan, R.Y. Fung [et al.] // Fuzzy Sets and Systems. — 2009. — Vol. 160, no. 5. — P. 683−695.

18. Adelzadeh, M. A mathematical model and a solving procedure for multi-depot vehicle routing problem with fuzzy time window and heterogeneous vehicle / M. Adelzadeh, V.M. Asl, M. Koosha // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2014. — Vol. 75, no. 5-8. — P. 793−802.

19. Yan, F. Modeling and solving the vehicle routing problem with multiple fuzzy time windows / F. Yan, Y. Wang // International Conference on Management Science and Engineering Management. Springer, Cham, 2017. — P. 847−857.

20. Cao, Q.K. Vehicle bonk routing optimization with multiple fuzzy time windows based on improved wolf pack algorithm / Q. K. Cao, K. W. Yang, X. Y. Ren // Advances in Production Engineering & Management. — 2017. — Vol. 12, no. 4. — P. 401−411. DOI: 10.14743/apem2017.4.267

21. Cheng, R. Vehicle routing problem with fuzzy due-time using genetic algorithms / R. Cheng, M. Gen, T. Tozawa // Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems. — 1995. — Vol. 7, no. 5. — P. 1050−1061.

22. Teodorovic, D. A fuzzy logic approach to dynamic dial-a-ride problem / D. Teodorovic, G. Radivojevic // Fuzzy sets and systems. — 2000. — Vol. 116, no. 1. — P. 23−33.

23. Zhang, J. Insertion heuristic algorithm for dynamic vehicle routing problem with fuzzy due-time / J. Zhang, J. Li, Y. Guo // Journal of Southwest Jiaotong University. — 2008. — Vol. 43, no. 1. — P. 107−113.

24. Gendreau, M. Metaheuristics for the vehicle routing problem and its extensions: A categorized bibliography / M. Gendreau, J.Y. Potvin, O. Bräumlaysy [et al.] // In: The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. Springer US. — 2008. — Vol. 43. — P. 143−169.

25. Teodorović, D. Application of fuzzy sets theory to the saving based vehicle routing algorithm / D. Teodorović, S. Kikuchi // Civil Engineering Systems. — 1991. — Vol. 8, no. 2. — P. 87−93.

26. Chen, J. A new algorithm for a fuzzy vehicle routing and scheduling problem: imperialist competitive algorithm / J. Chen, Y. Zhang, G. Wang // JCIT: Journal of Convergence Information Technology. — 2011. — Vol. 6, no. 7. — P. 303−311.

27. Zheng, Y. Fuzzy vehicle routing model with credibility measure and its hybrid intelligent algorithm / Y. Zheng, B. Liu // Applied mathematics and computation. — 2006. — Vol. 176, no. 2. — P. 673−683.

28. Jia, J. Genetic algorithm for fuzzy logistics distribution vehicle routing problem / J. Jia, N. Liu, R. Wang // IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. — 2008. — Vol. 1. — P. 1427−1432.

29. Brito, J. Fuzzy approach for vehicle routing problems with fuzzy travel time / J. Brito, F.J. Martinez, J.A. Moreno [et al.] // IEEE International Conference on Fuzzy Systems. — 2010. — P. 1−8.

30. Zhang, J. A hybrid genetic algorithm to the vehicle routing problem with fuzzy cost coefficients / J. Zhang, J. Li // IEEE 11th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). — 2014. — P. 147−152.

31. Kuo, R. J. Application of a fuzzy ant colony system to solve the dynamic vehicle routing problem with uncertain service time / R. J. Kuo, B. S. Wibowo, F. E. Zulvia // Applied Mathematical Modelling. — 2016. — Vol. 40, no. 23−24. — P. 9990−10001.

32. Zhang, J. Modified Clark-Wright Algorithm for Vehicle Scheduling Problem with Fuzzy Cost Coefficients / J. Zhang, J. Li, Y. Guo // Journal of Southwest Jiaotong University. — 2008. — Vol. 39, no. 6. — P. 281−284.

33. Tang, J. Vehicle routing problem with fuzzy time windows / J. Tang, Z. Pan, R. Y. Fung [et al.] // Fuzzy Sets and Systems. — 2009. — Vol. 160, no. 5. — P. 683−695.

34. Lu, L. Study Dynamic vehicle scheduling problem model under fuzzy information / L. Lu, Q. Tan // Chinese Journal of Management Science. — 2006. — Iss. z1. — P. 156−160.

35. Jiang, Z. Research on Bi-objective fuzzy programming model and algorithm of logistics distribution vehicle routing problem / Z. Jiang, Y. Sheng, D. Wang [et al.] // Chinese Journal of Enterprise Operation Research. — 2008. — No. 1. — P. 19−27.

36. Абрамова, И. О. Зеленая транспортная логистика как инструмент совершенствования хозяйственной деятельности транспортных компаний / И. О. Абрамова, М. Ш. Муртазина. // Вестник евразийской науки. — 2018. — Т. 10, № 3. — С. 2–12.

37. Erdoğan, S. A green vehicle routing problem / S. Erdoğan, E. Miller-Hooks // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2012. — Vol. 48, no. 1. — P. 100−114.

38. Wang, R. Solving the green-fuzzy vehicle routing problem using a revised hybrid intelligent algorithm / R. Wang, J. Zhou, X. Yi [et al.] // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. — 2019. — Vol. 10, no. 1. — P. 321−332.

Сдана в редакцию 16.04.2020
Запланирована в номер 10.07.2020

Об авторах:

Чернышев Юрий Олегович, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4901-1101, treandrik@yandex.ru

Кубил Виктор Николаевич, ассистент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», (346428, РФ, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), ResearcherID: AAB-8676-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4364-4135, treandrik@yandex.ru

Требухин Андрей Владимирович, аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6673-706X , treandrik@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ю. О. Чернышев — научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи. В. Н. Кубил — сбор и анализ литературных данных, критический анализ. А. В. Требухин — литературный анализ, участие в исследовании, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 004.94 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345



К вопросу о компьютерном моделировании

М. В. Ядровская
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Моделирование служит методологической основой современной науки и инструментом познавательной деятельности. Его можно рассматривать как мыслительную деятельность, опосредованную и оптимизированную информационными моделями. В этом случае к информации применяются логические операции познания и приемы моделирования.
Материалы и методы. Изучены и обобщены результаты научных исследований о том, как в памяти человека формируются, хранятся и обрабатываются знания, как они взаимодействуют с представлениями информации. Проанализированы информационные модели, применяемые в различных предметных областях. Сформулированы положения о рациональных способах представления информации в процессе моделирования и указаны компьютерные средства для построения таких представлений.
Результаты исследования. Выявлены приемы, методы, техники визуализации информации об изучаемом объекте. Представлены программные средства и сервисы, которые позволяют создавать визуализации и выполнять исследовательские процедуры моделирования.
Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процедур моделирования. С помощью описанных приемов, методов и техник в специальных программах визуализируются образы, структуры, отношения и связи изучаемого объекта. Они, в свою очередь, опосредуют процесс мысленного моделирования и расширяют базу для его выполнения.

Ключевые слова: моделирование, модель, информационные технологии, информационная модель, компьютерная модель, представление информации, компьютерные средства моделирования, компьютерные среды моделирования.

Для цитирования: Ядровская, М. В. К вопросу о компьютерном моделировании / М. В. Ядровская // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 332−345. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345



Revisiting computer modeling

M. V. Yadrovskaya
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. Modeling serves as a methodological basis for modern science and a tool for cognitive activity. It can be considered as a thinking activity mediated and optimized through information models. In this case, logical operations of cognition and simulation techniques are applied to the information.
Materials and Methods. The scientific research results on how knowledge is formed, stored and processed in a person's memory, how they interact with information representations are studied and summarized. Information models used in various subject domains are analyzed. The provisions on rational ways of presenting information under modeling are formulated, and computer tools for constructing such representations are indicated.
Results. Methods and techniques for visualizing information on the object under study are specified. Software tools and services providing visualizations and research modeling procedures are given.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be used to optimize modeling procedures. Images, structures, relationships and connections of the object under study are visualized in special programs with the help of the described methods and techniques. They, in turn, mediate the process of mental modeling and broaden the basis for its implementation.

Keywords: modeling, model, information technologies, information model, computer model, information representation, computer simulation techniques, computer modeling environments.

For citation: M. V. Yadrovskaya. Revisiting computer modeling. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 332−345. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345

Введение. Моделирование используется для теоретического и практического исследования объектов, процессов, явлений. Оно имеет общенаучный характер, является объективным, универсальным методом познания и применяется для изучения живой и неживой природы. Моделирование служит методологической основой современной науки и инструментом познавательной деятельности.

Развитие вычислительной техники и информационных технологий способствует успеху информационного моделирования. Такой подход предполагает применение процедур исследования к формализованной информации об объекте изучения, замещающей или воспроизводящей объект. Информационная модель становится современным инструментом решения различных задач с помощью информационных технологий и звеном, связывающим любую предметную область с информатикой.

Моделирование характеризуется, с одной стороны, разнообразием применяемых моделей (рис. 1), с другой — разнообразием средств их построения и изучения.

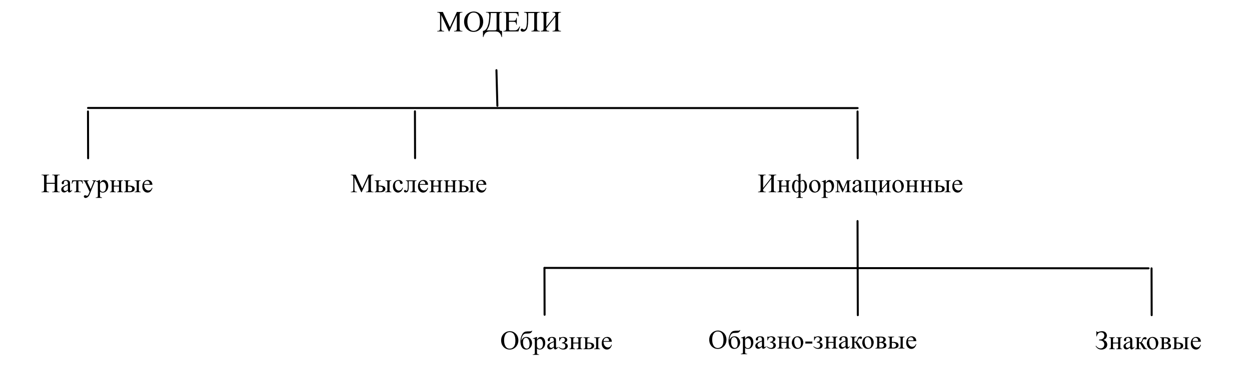


Рис. 1. Классификация моделей по форме представления

Обобщая многие определения, под информационной моделью [1] мы будем понимать информацию, которая описывает существенные свойства объекта и его связи, формализована с точки зрения цели исследования и зафиксирована на информационном носителе. Такое определение позволяет четко обозначить тесную связь информатики и моделирования и анализировать информационные технологии как современные средства моделирования. Информация может быть представлена в разной форме, поэтому в информатике [2] изучают различные информационные модели: вербальные, графические, математические, табличные, алгоритмические, имитационные и др. В теории познания любую модель можно считать информационной, если она включена в информационный процесс познания.

Рассмотрим этапы информационного моделирования.

Первый — анализ объекта и его связей, предполагающий выполнение логических операций познания. Это сравнение, классификация, систематизация, обобщение, конкретизация, построение умозаключений, идеализация (построение абстракций). Задействуются такие приемы моделирования, как наблюдение, анализ, синтез, аналогия, построение гипотез, формализация.

Второй этап — практические действия. Это собственно моделирование (построение модели) и операции с нею (перестраивание, видоизменение, реализация модели, экспериментирование, интерпретация, верификация, замена). Действия с элементами модели: вычитание, сложение, дополнение. [1].

Третий этап — построение алгоритмов для реализации модели в конкретной предметной области, привлечение информационных технологий для работы с моделью.

«Эти три этапа отражают, с одной стороны, основные ступени познания: чувственную — рациональную — деятельностную, с другой стороны — классическую триаду информационного моделирования: информация — модель — алгоритм» [3].

Компьютерная модель строится на основе информационной модели. Компьютерное моделирование представляет собой совокупность аппаратно-программных средств и технологий работы с этими моделями. С. А. Бешенков подчеркивает, что «вполне можно вести речь о компьютерном моделировании как особом виде информационного моделирования» [4]. Информационные технологии, используемые для работы с информационными моделями, определяют тип последних (образные, образно-знаковые и знаковые). Их классификация представлена на рис. 2.

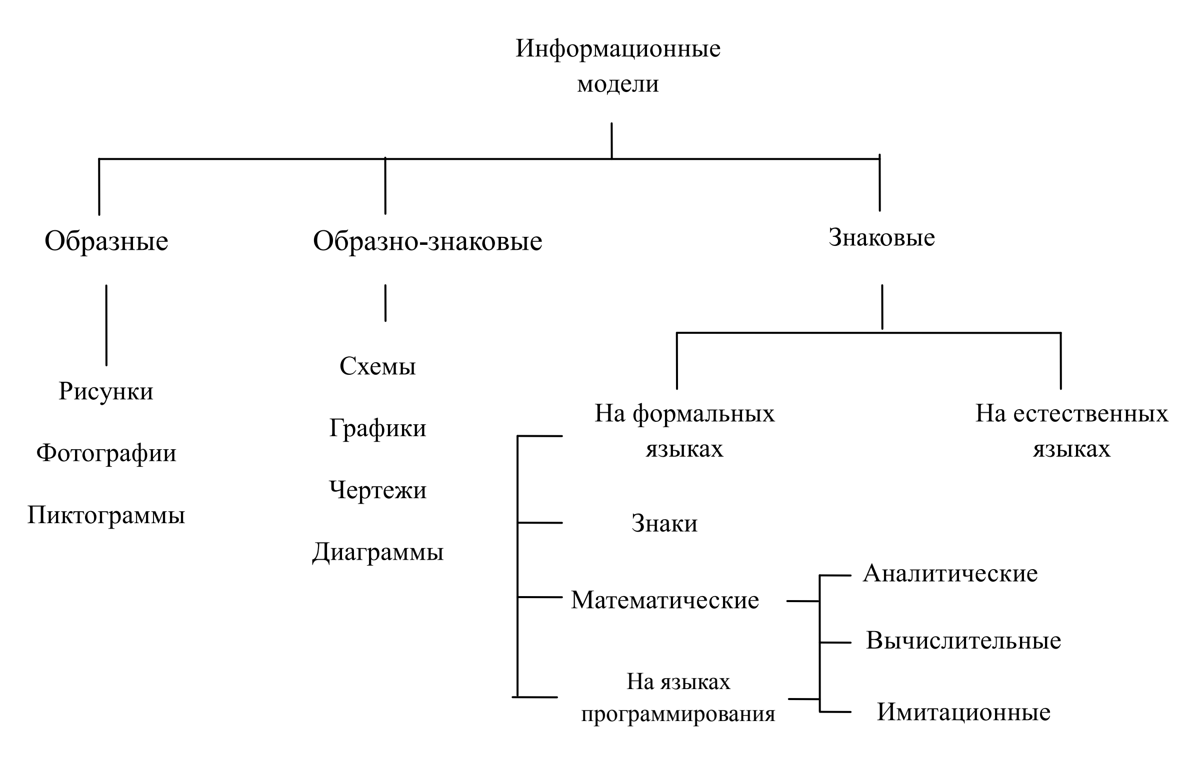


Рис. 2. Классификация информационных моделей в зависимости от информационных технологий

Перечислим некоторые средства компьютерного моделирования:

— визуальные — аппаратно-программные средства и технологии работы с компьютерной графикой, видеоизображениями, анимацией, звуком, виртуальной реальностью;

— вербальные — текстовые редакторы и процессоры, системы оптического распознавания символов, издательские системы, языки разметки гипертекста;

— математические — электронные калькуляторы, пакеты программ для математических расчетов, программы для аналитических преобразований, расчетно-информационные комплексы, виртуальные лаборатории;

— системы моделирования — пакеты визуального моделирования, системы имитационного моделирования, программы генерации фрактальных изображений, табличные процессоры, презентационные пакеты, средства автоматизированного проектирования (САПР), геоинформационные системы;

— языки и системы программирования [5].

Связанные с моделированием задачи решаются в компьютерных моделирующих средах [5]. Это предполагает специализацию, взаимосвязь модулей и языка моделирования и повышает скорость исследования. Например, САПР — важнейшие средства построения связанных между собой моделей внутри проекта создаваемого объекта. Моделирующая среда состоит из нескольких модулей, позволяющих создать рисунок, чертеж, 3D модель будущего объекта и в моделирующей среде проводить над моделью компьютерные эксперименты, определяя возможные свойства объекта и прогнозируя вероятные события.

По мнению С. И. Архангельского, «моделирование как форма изучения обеспечивает наиболее четко выраженную связь опытных данных и теоретических взглядов». Это позволяет рассматривать модель как «определенную упорядоченную взаимосвязь мыслимой (теоретической) и опытной информаций на основе выделения изучаемых сторон и признаков объекта путем упрощения, или усложнения, или абстрагирования» [6]. Здесь теоретическая информация — это информация, представляющая объект исследования, т. е. отобранная и формализованная с точки зрения цели изучения. Это основа мысленного и опосредованного знаками оперирования. Опытную информацию исследователь получает в процессе моделирования, изучая теоретические данные, являющиеся ориентировочной основой его мыслительной деятельности. Иначе говоря, в процессе моделирования создается цепочка мысленных моделей. Некоторые из них фиксируются в знаковой форме. До тех пор, пока не будет получено новое знание, выполняются логические операции и операции моделирования с опорой на построенные знаковые представления. При построении представления объекта исследования, создаются объекты оперирования для мышления, стимулируется работа мышления, нацеленная на исследование модели. При этом знание об объекте анализируется, уточнятся, изменяется и углубляется.

Таким образом, основа моделирования — мыслительная деятельность, информационные модели — средство активизации этой деятельности. Процесс моделирования можно рассматривать как мыслительную деятельность, опосредованную информационными моделями.

Материалы и методы. Моделирование — это многоэтапная, циклическая процедура. Невозможно одномоментно построить, изучить модель объекта и получить знание. В процессе моделирования к информации необходимо многократно применять логические операции познания и приемы моделирования. Задача данного исследования состоит в том, чтобы выделить приемы, методы, техники представления информации, поддерживающие выполнение логических процедур моделирования. Необходимо также отметить компьютерные средства, применение которых активизирует и рационализирует процесс информационного моделирования. Для решения этой задачи используется обобщенный научный и педагогический опыт и практические знания моделирования.

Чтобы информационные модели эффективно помогали получать знания в процессе моделирования, необходимо:

— знать и применять закономерности оперирования представлениями и знаниями;

— использовать компьютерные технологии для формирования представлений.

При этом важно учитывать научные данные о том, как в памяти человека формируются, хранятся и обрабатываются знания, как они взаимодействуют с представлениями информации.

Существует несколько гипотез о представлении информации в памяти.

«Согласно гипотезе двойного кодирования, информация может кодироваться и храниться в одной из двух или обеих системах — вербальной и образной. Эта позиция подтверждается неврологическими и поведенческими данными» [7].

Согласно концептуально-пропозициональной гипотезе, информация хранится в абстрактном пропозициональном формате, который определяет объекты, события и их отношения.

«Радикальная теория образов предполагает, что некоторая информация представлена только в виде образов» [7]. Н. И. Колодина считает, что «вся воспринимаемая человеком информация кодируется в сознании одновременно через зрение, слух, обоняние, осязание, пережитые эмоции» и представляется «в сознании индивида в виде единиц знаний», называемых мнемоединицами знаний (МЕЗ). Эти единицы «структурированы в сознании соответственно каналам восприятия» и «постоянно переформировываются, образуя все новые связи между собой». Н. И. Колодина предлагает модель сознания как «структурированную совокупность единиц знания». Формирование мыслительных образований в этой модели происходит в результате взаимодействия единиц знания с окружающей действительностью. Затем МЕЗ интегрируются друг с другом по законам единой логико-мыслительной базы [7].

«В случае активизации лишь одной единицы, находящейся в любой зоне структуры, возникает цепная активизация других единиц знаний, имеющих устойчивые связи с активизированной единицей» [8]. Данная гипотеза перекликается с коннекционистским описанием работы речевого механизма. Оно базируется на результатах исследования переработки информации мозгом. При этом формы знания предстают в виде сетевой структуры. Сеть состоит из узлов и связей между ними (коннекционизм — от англ. connect: соединение, связь, подключение). Эффективное функционирование сетевой системы обеспечивает распространение активации [9, 10].

Н. И. Жинкин выдвинул гипотезу существования в сознании человека универсального предметного кода (УПК). «УПК — язык интеллекта, базовый компонент мышления. Это язык схем, образов, отпечатков реальности (осязательных, обонятельных), кинетических (двигательных) импульсов и т. д. УПК — это язык, на котором происходит первичная запись личностного смысла» [9]. УПК — это код, с помощью которого информация превращается в «первичные знания», наборы МЕЗ, которые можно сопоставить с представлениями из когнитивной лингвистики: «представления включают в себя собственно представления, образы и понятия, а также связанные с ними оценки и коннотации». Следовательно, с одной стороны, представления — это мысленные модели, с другой — субъективная основа объективного знания. Представления формируются в процессе мысленного моделирования реальности. По Г. Фреге, как отмечает В. В. Красных, представление есть «внутренний образ предмета, возникший из воспоминаний о чувственных впечатлениях» [9].

Результаты исследования. Обобщив представленные выше научные суждения, можно сформулировать положения о способах представления теоретической информации в моделях и назвать компьютерные средства для таких построений.

Первичные знания — собственно представления, образы, понятия и оценки. Для формирования представлений имеют значение все каналы поступления информации: зрительный, слуховой, обонятельный, вкусовой, осязательный, кинестетический. Согласно экспериментальным данным, зрительное кодирование

происходит раньше акустического и семантического [7], поэтому при формировании знаний способы визуального моделирования информации являются опорными и дополняются другими.

Большое значение картинки, цвет, представление деталей имеют в следующих способах передачи информации: «линза» и техника «рыбий глаз» (Adobe Photoshop, Corel Draw, Inkscape, Blender), графическое упрощение, карты, цветные гистограммы (Paint, Word, Excel, Corel Draw, Inkscape и др.), визуальный словарь (Word, Excel, HTML, PHP).

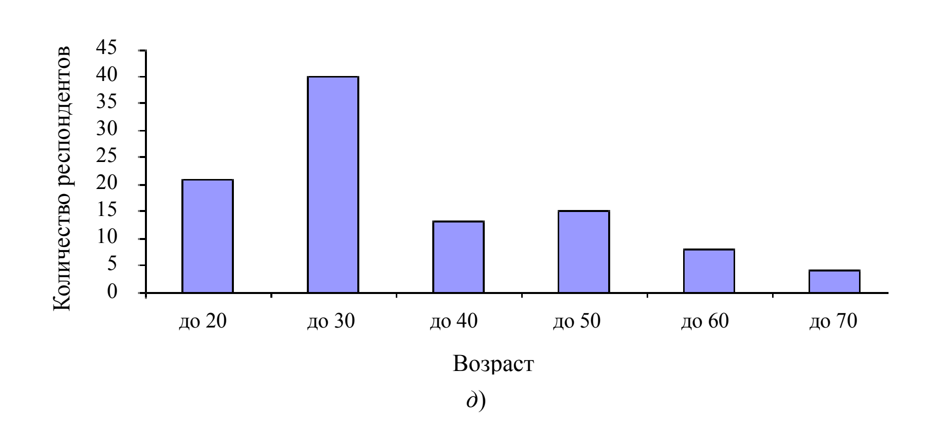
а)

б)

в)

г)

Гистограмма распределения возраста респондентов



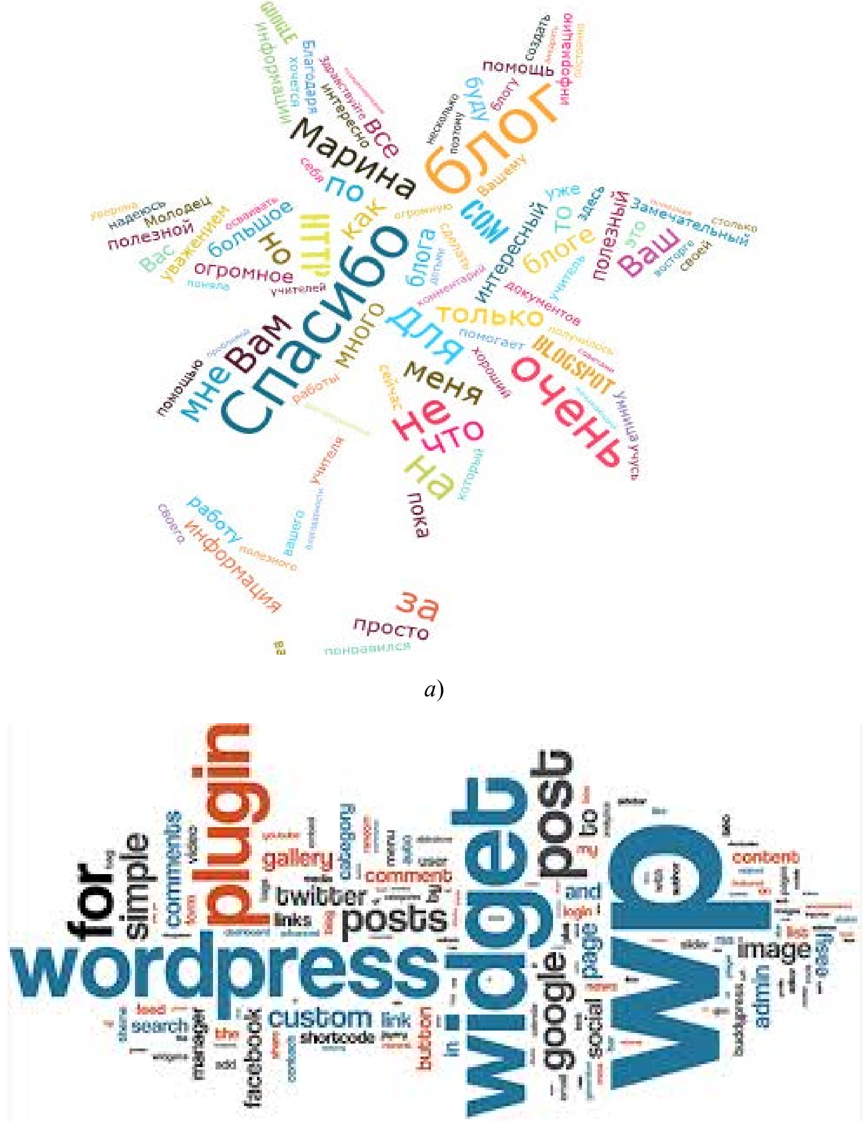
д)



е)

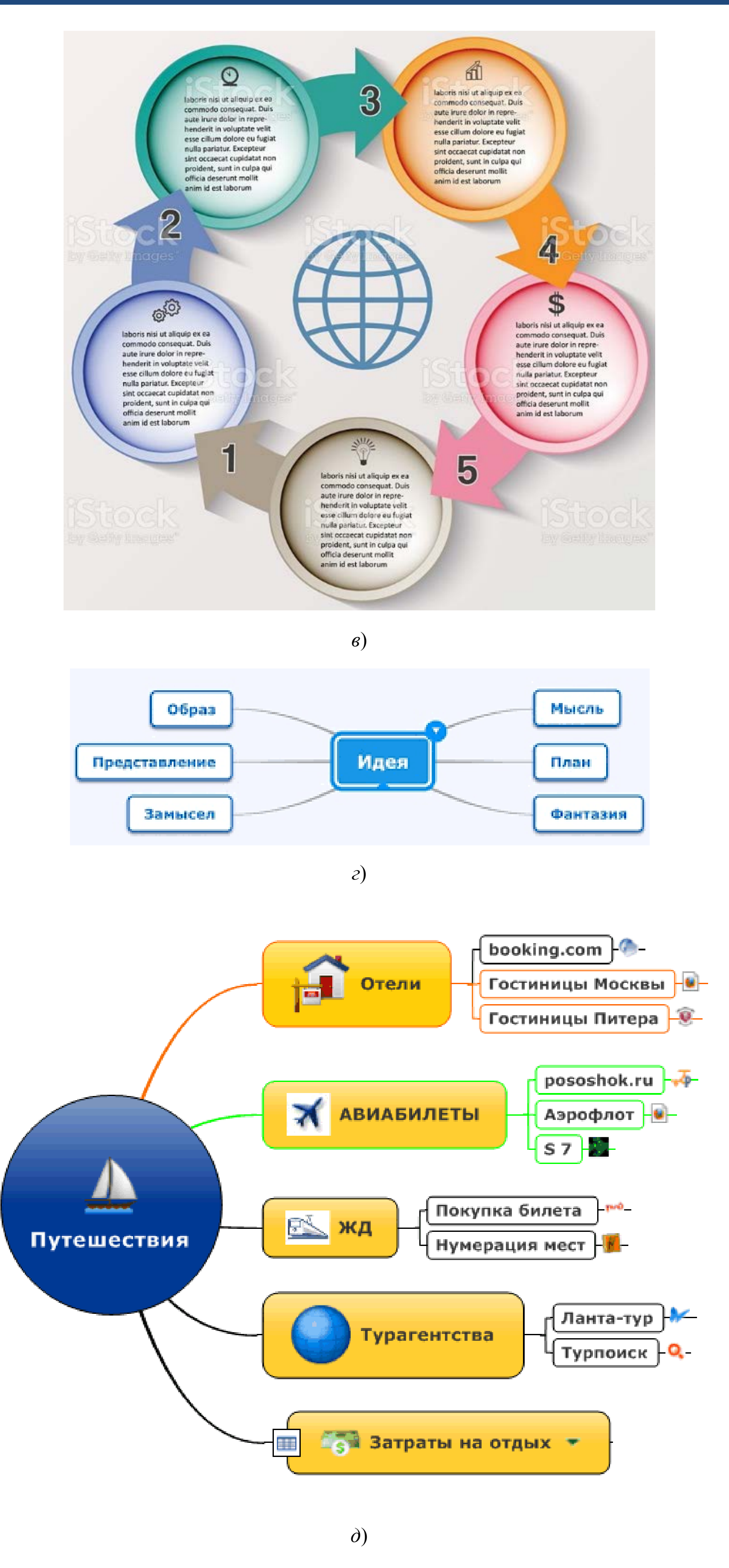
Рис. 3. Примеры представления информации: линза (*а*); «рыбий глаз» (*б*); графическое упрощение (*в)*; представлено понятие «эволюция»); карта (*г*); гистограмма (*д*); визуальный словарь (*е*)

Наибольшее значение имеют вербальная и образная системы кодирования, поэтому большинство способов представления информации включают одновременно рисунки, знаки, слова, тексты. Это могут быть облако тегов, слов (Wordle, Tagul, Many Eyes, Word it Out, Togxedo-Creator), ментальные карты (MindManager, Mindmeister, FreeMind, XMind), карты и циклические схемы (Corel Draw, Inkscape, Excel, Word, Adobe Flash) и др.



а)

б)



в)

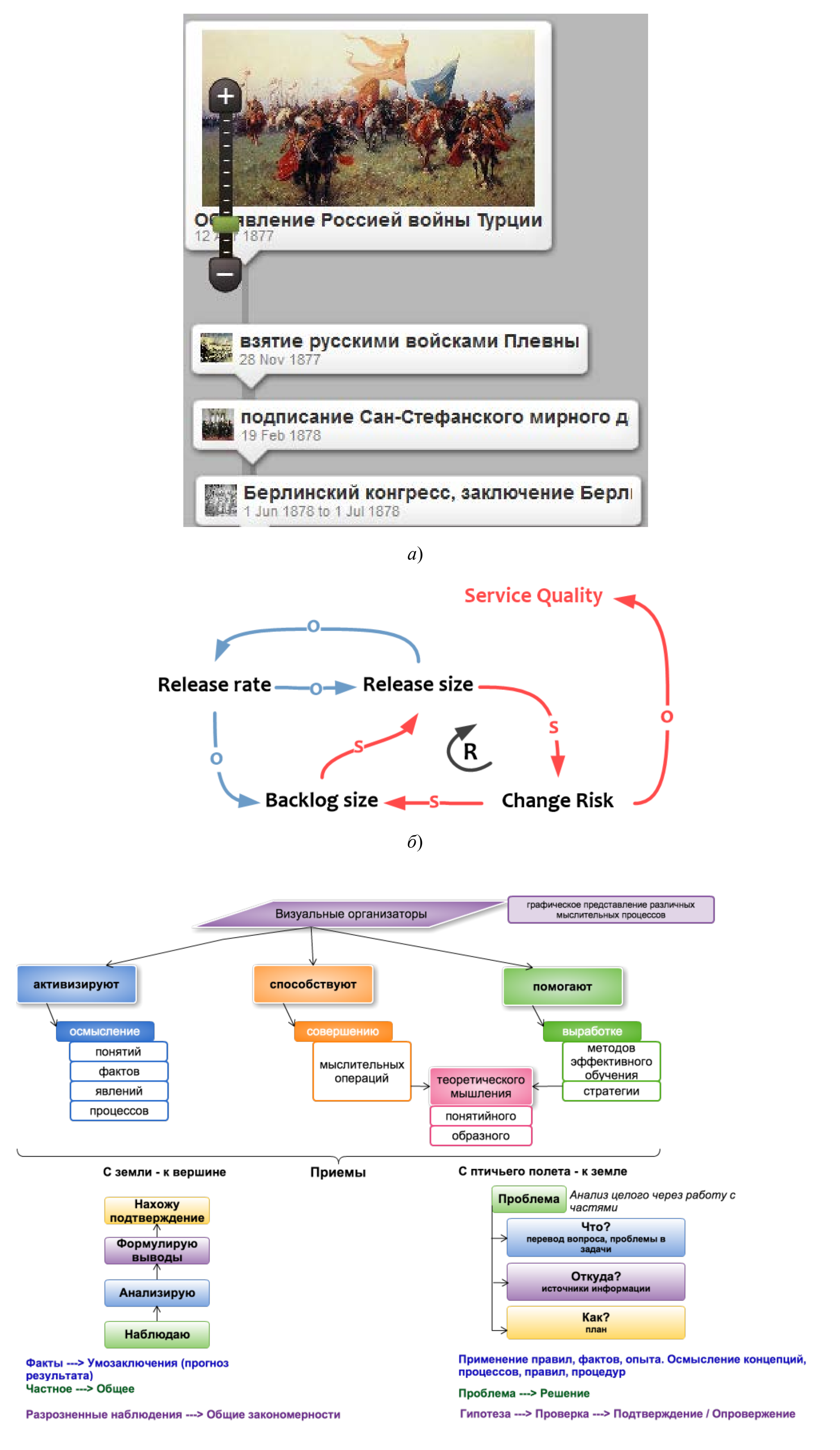
г)

д)

Рис. 4. Примеры представления информации: облако слов и тегов (*а*, *б*); циклическая схема (*в*); ментальные карты (*г*, *д*)

Хранение знаний предполагает фиксирование данных об объектах, событиях и их отношениях. Этому формату соответствуют следующие способы представления данных: ленты времени (Dipity, ClassTools, Timerime), причинные цепочки ((Paint, Word, Corel Draw, Inkscape), индуктивные башни (сервисы Bubbl.us,

Cacoo.com), диаграммы сродства Ганта (SchedRoll, Gantt Designer, Mindjet JCVGantt Pro, Microsoft Project, Excel), Исикавы, Венна (Corel Draw, Inkscape, Excel, Word) и др.



а)

б)

в)

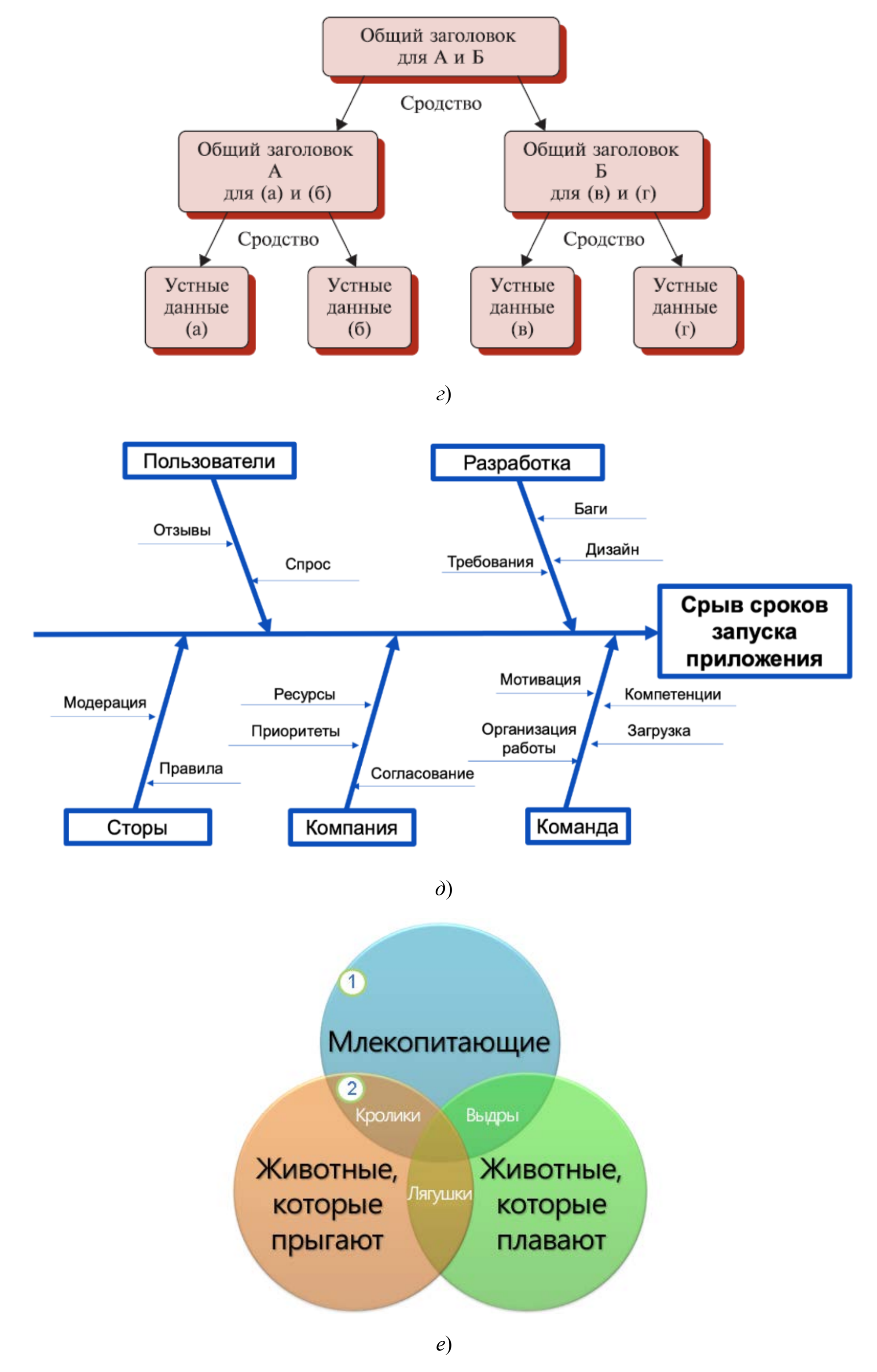
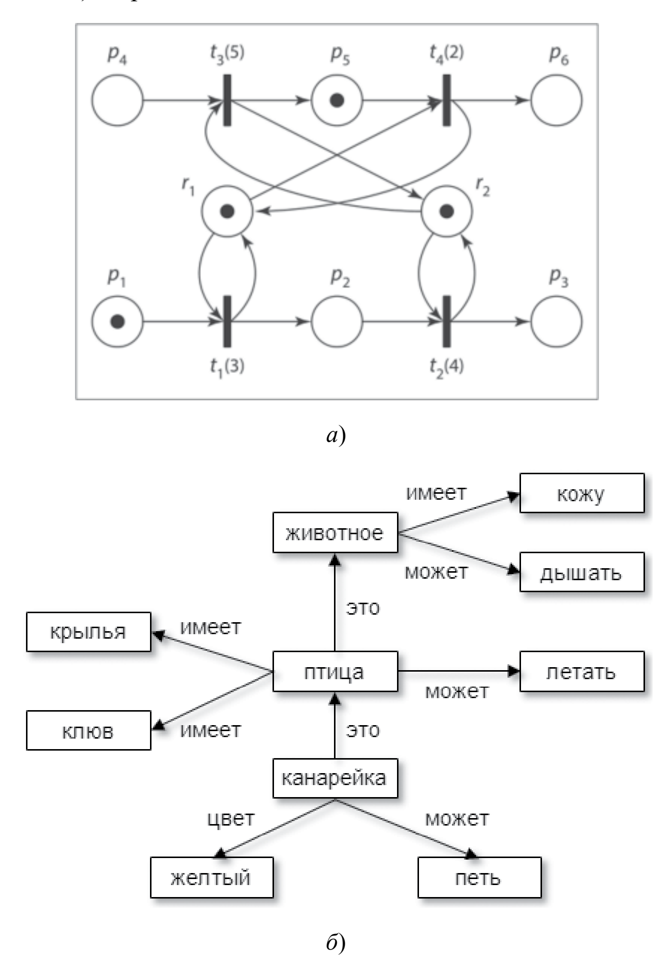


Рис. 5. Примеры представления информации: лента времени (*а*); причинная цепочка (*б*); индуктивная башня (*в*); диаграмма сродства (*г*); диаграмма Исикавы (*д*); диаграмма Венна (*е*)

Единицы знания в сознании структурированы в соответствии с каналами восприятия, постоянно переформировываются и образуют новые взаимосвязи. Мыслительные образования формируются в результате взаимодействия единиц знания с окружающей действительностью. Очень важно при решении сложных задач опираться на реалистические и динамические представления объектов исследования. В процессе моделирования для представления информации об объекте следует использовать средства мультимедиа и виртуальной реальности: фото, видео, звук, анимацию (Gimp, Adobe Flash, HTML5, видеоплейеры и др.); трехмерные представления (VRML. Blender и др.).

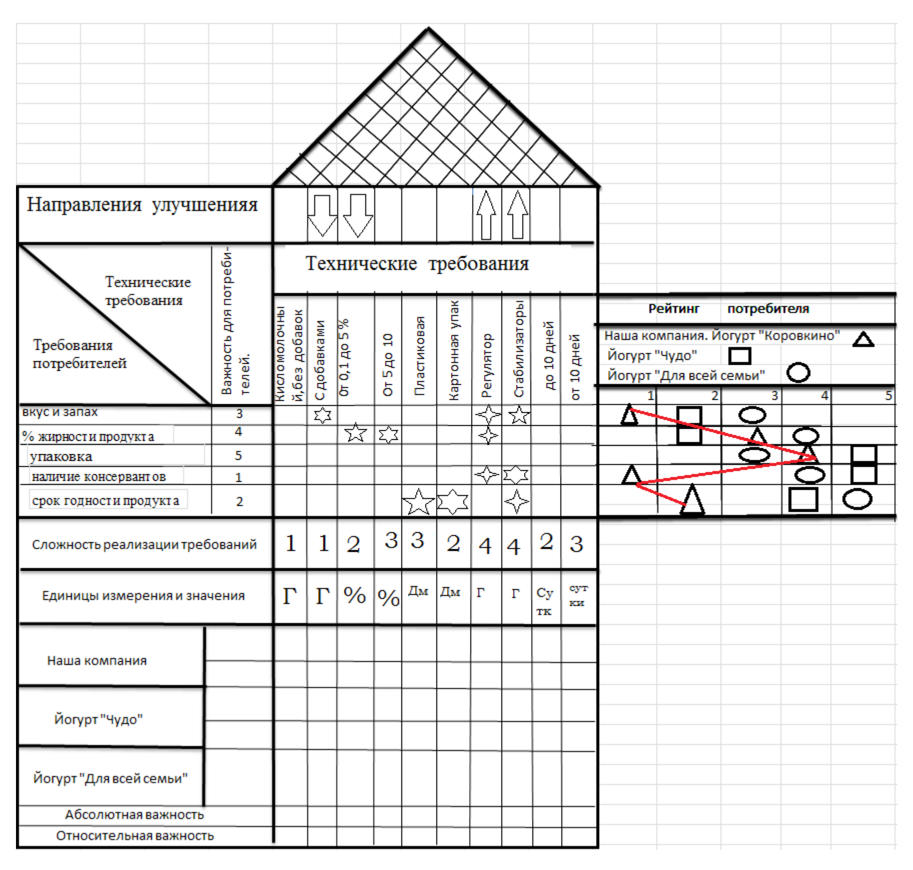
Все формы знания предстают в виде сетевой структуры, которая функционирует с помощью механизма распространяющейся активации: сети Петри, семантические сети, дом качества, гиперболические деревья,

пирамиды (Corel Draw, Inkscape, Excel, Word), диаграммы потоков данных (Excel, Word, MS Visio, BPwin), визуальный учебник (HTML, PHP) и др.



а)

б)



в)

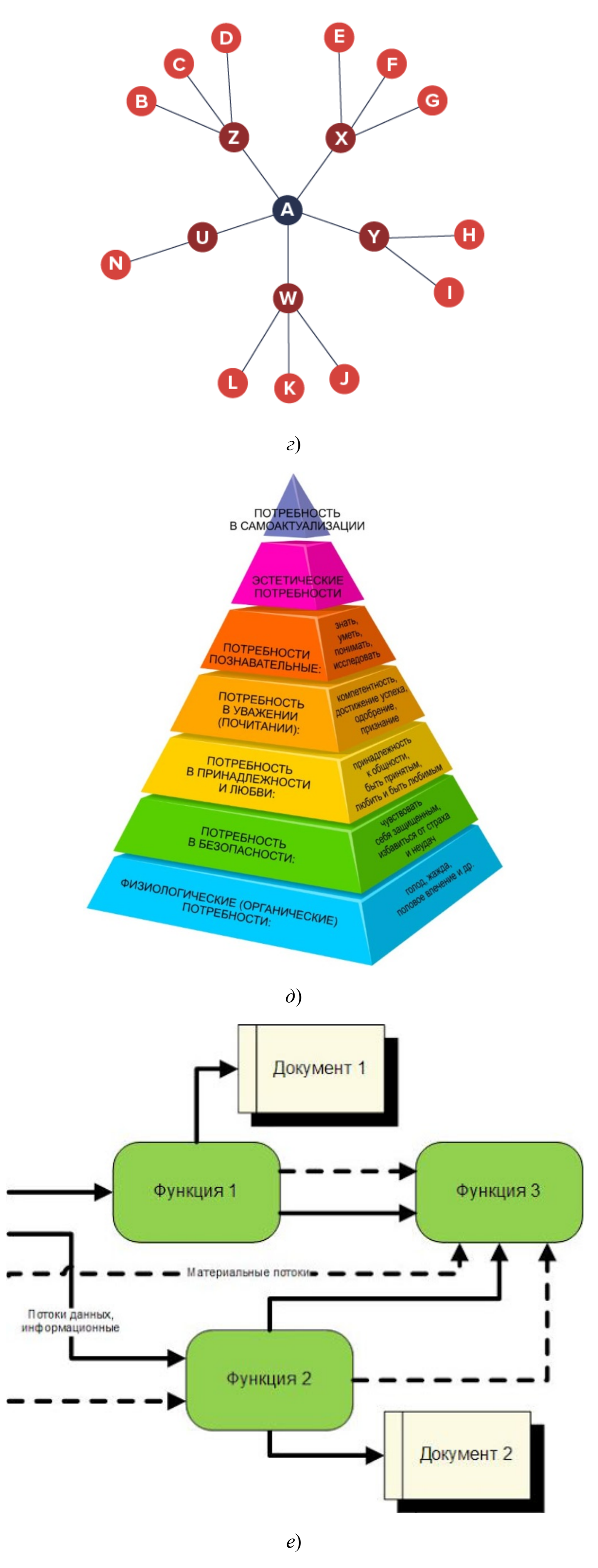
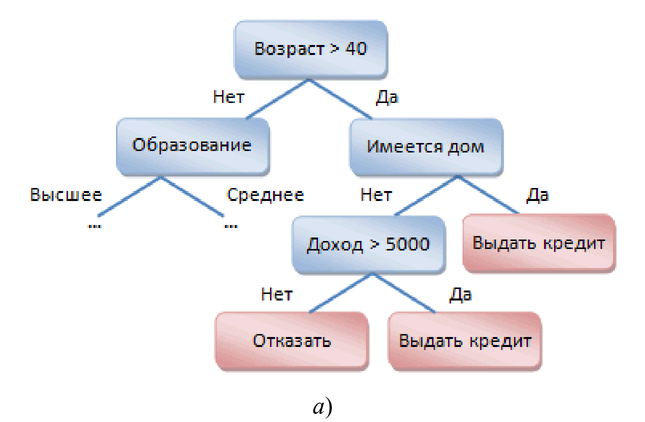
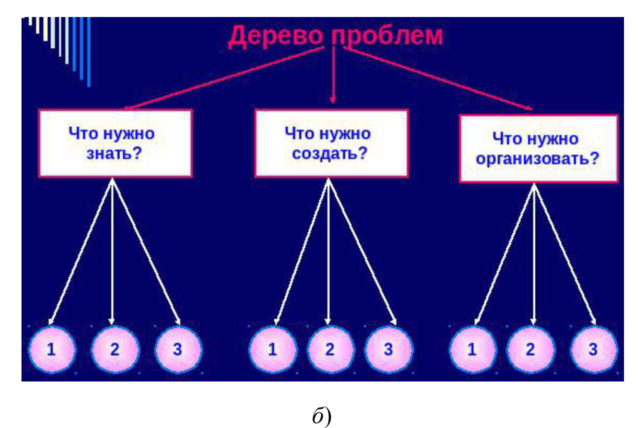


Рис. 6. Примеры представления информации: сеть Петри (*а*), семантическая сеть (*б*); дом качества (*в*); гиперболическое дерево (*г*), пирамида (*д*), диаграмма потоков данных (*е*)

Язык интеллекта — язык схем, образов, отпечатков реальности (осязательных, обонятельных), кинетических (двигательных) импульсов. В этом ключе строятся деревья решений и проблем, схемы жизненного цикла и аргументации, воронки данных (Corel Draw, Inkscape, Excel, Word) и др.



а)



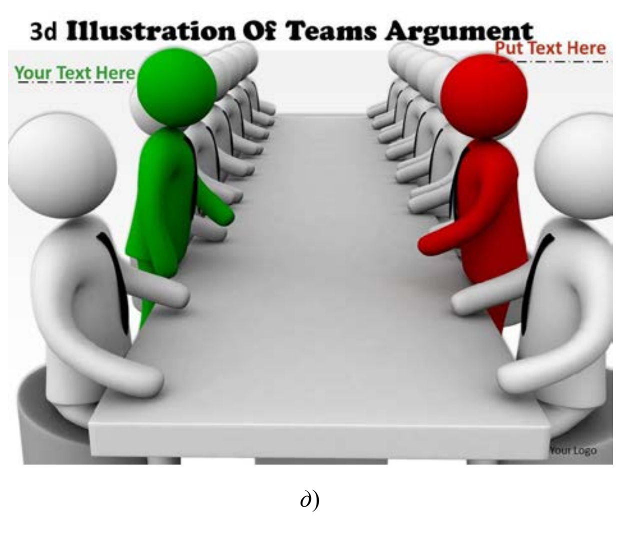
б)



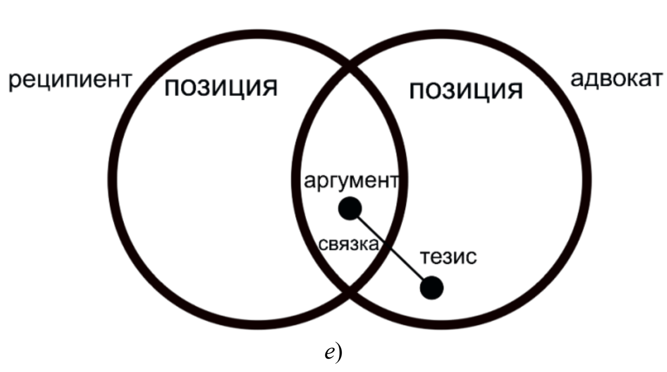
в)



г)



д)



е)

Рис. 7. Примеры представления информации: дерево решений (*а*), дерево проблем (*б*); жизненный цикл (*в*); воронка (*г*), аргумент-слайд (*д*), аргументация (*е*)

Итак, широко применяемые в разных предметных областях способы графической визуализации информации основываются на научных положениях о формировании первичных знаний, их связи и хранении в памяти человека. Эти способы опосредуют процесс мысленного моделирования. Они помогают создавать и сохранить на информационном носителе образы, структуру, отношения, связи изучаемого объекта для процедур моделирования. При этом появляется возможность выполнять действия моделирования не только индивидуально, но и в команде, используя опыт членов коллектива, что рационализирует процесс моделирования. При этом важно использовать программные средства и сервисы для создания визуализаций, которые помогут в исследовании моделирования.

Для повышения эффективности моделирования задействуют адекватные задачам методы графической визуализации, а также IT-средства представления данных: мультимедийные системы, компьютерные системы визуализации и поддержки принятия решений, экспертные системы, системы управления проектами, системы когнитивного моделирования, имитационно-моделирующие среды, компьютерные игры, средства агентного моделирования и др.

Заключение. Информационный и логический аспекты моделирования объединяют три важнейшие категории познания — информацию, представление, знание. Действия с моделями — поиск, отбор, представление и обработка имеющейся информации об объекте исследования, на основе которой можно получить новые знания о нем. Для этого задействуют средства информационных процессов и технологий. Ведущую роль играет компьютерное моделирование. Оптимизация — важная функция мыслительной составляющей моделирования как первоосновы модельного способа познания. При мысленном моделировании на основе чувственного восприятия строится образ, к которому применяются операции анализа, синтеза, сравнения, абстрагирования, обобщения, систематизации, классификации и логические операции, позволяющие преобразовать чувственный образ в логическую модель познания. С помощью мысленного моделирования человек сначала формирует информационную модель объекта исследования, а затем ее изучает путем построения ряда взаимосвязанных мысленных представлений и соответствующих им информационных моделей.

Использование компьютерных средств представления информации позволяет оптимизировать мыслительную деятельность. При этом визуализируются различные параметры и связи изучаемого объекта.

Современные компьютерные средства моделирования дополняют, расширяют и модифицируют традиционные средства моделирования.

Библиографический список

1. Ядровская, М. В. Модели и моделирование в педагогике / М. В. Ядровская. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2014. — 359 с.
2. Глинский, Б. А. Философские и социальные проблемы информатики / Б. А. Глинский. — Москва : Наука, 1990. — 108 с.
3. Филатов, О. К. Основные подходы к построению информационной модели процесса обучения / О. К. Филатов // Информатика и образование. — 2007. — № 6. — С. 3−7.
4. Бешенков, С. А. Информатика. Систематический курс / С. А. Бешенков, Е. А. Ракитина. — Москва : Лаборатория базовых знаний, 2001. — 432 с.
5. Ядровская, М. В. Средства моделирования в обучении / М. В. Ядровская // Вестник Северо-восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. — 2010. —Т. 7, № 1. — С. 89–95.
6. Архангельский, С. И. Лекции по научной организации учебного процесса в высшей школе / С. И. Архангельский. — Москва : Высшая школа. — 1976. — 200 с.
7. Солсо, Р. Когнитивная психология / Р. Солсо. — Санкт-Петербург : Питер, 2002. — 592 с.
8. Колодина, Н. И. Проблемы понимания и интерпретации художественного текста / Н. И. Колодина. — Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2002. — 183 с.
9. Красных, В. В. Основы психолингвистики и теории коммуникации / В. В. Красных. — Москва : Гнозис, 2001. — 270 с.
10. Корниевская, С. И. Некоторые исследования процессов доступа к слову / С. И. Корниевская // Вестник ТвГУ. — 2009. — № 3. — С. 38–49. — (Филология).

Сдана в редакцию 18.05.2020
Запланирована в номер 10.08.2020

Об авторе:

Ядровская Марина Владимировна, доцент кафедры «Массовые коммуникации и мультимедийные технологии» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4469-1603, marinayadrovskaia@rambler.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.